

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی استخراج معدن

رساله دکتری

توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ مخازن نفت و گاز مبتنی بر نرخ نفوذ حفاری

نگارنده: محمد انه منگلی

استاد راهنما:

دکتر احمد رمضانزاده

استاد مشاور:

دکتر بهزاد تخمچی

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۲۶۹۶۲۰۲۳
تاریخ: ۱۴۷۳
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای محمد انه منگلی دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن به شماره دانشجویی ۹۱۲۵۰۹۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۹۶/۶/۲۱ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ مخازن نفت و گاز مبتنی بر نرخ نفوذ حفاری
دفاع و با اخذ نمره ۱۹.۲۵ به درجه عالی نائل گردید.

<input type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد.
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد.	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر احمد رمضانزاده	استاد راهنما	استادیار	(مهر)
۲	دکتر بهزاد تخمچی	مشاور	دانشیار	
۳	دکتر کورش شهریار	استاد مدعو خارجی	استاد	
۴	دکتر محمد عطایی	استاد مدعو داخلی	استاد	
۵	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۶	دکتر محمد کارآموزیان	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای محمد انه منگلی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به

روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم

و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

و به: همسر، اسطوره زندگیم، پناه حکیم و امید بودم.

تشکر و قدردانی

تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت-هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب " من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ":

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر احمد رمضان‌زاده که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛

از استاد صبور و با تقوا، جناب آقای دکتر بهزاد تخم‌چی که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این رساله به نتیجه مطلوب نمی رسید؛

از مشاورین صنعتی محترم جناب آقایان آرام محمدیان و عبدالله ملقب کمال تشکر و قدردانی را دارم که اگر حمایت‌شان نبود این رساله ناقص باقی می ماند؛

از جناب آقای دکتر بدیل پهلوان که نکات فنی بسیار ارزنده‌ای را به منظور انجام هر چه بهتر آزمایش نفوذ بیان داشتند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

و از شرکت مکانیک سنگ نفت آسیا (مسنا) که تجهیزات آزمایشگاهی را در راستای انجام آزمایش نفوذ طراحی و در اختیار گذاشتند؛ تشکر و قدردانی می گردد.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید

تعهدنامه

اینجانب **محمد انه منگلی** دانشجوی دوره دکتری رشته استخراج-مهندسی معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده رساله با عنوان "**توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ مخازن نفت و گاز مبنی بر نرخ نفوذ حفاری**" تحت راهنمایی **دکتر احمد رمضانزاده** و مشاوره **دکتر بهزاد تخمچی** متعهد می‌شوم:

- ❖ تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار می‌باشد.
- ❖ در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ❖ مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ‌جا ارائه نشده است.
- ❖ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام "**دانشگاه صنعتی شاهرود**" و یا "**Shahrood University of Technology**" به چاپ رسیده است.
- ❖ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت می‌گردد.
- ❖ در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ❖ در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- ❖ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- ❖ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

قابلیت حفاری سنگ یک شاخص کمی است که به طور گسترده در زمین‌شناسی، معدن، نفت و رشته‌های مهندسی دیگر برای ارزیابی سختی یا آسانی حفر یک سنگ به کار می‌رود. به دلیل اهمیت بالای این پارامتر در بهبود نتایج مدل‌های تخمین‌گر نرخ نفوذ ابزارهای حفاری، تحقیقات گسترده‌ای در حوزه معدن و عمران برای تعیین آن صورت گرفته است. این در حالی است که در حوزه نفت و گاز، در مطالعات محدودی به اندازه‌گیری این پارامتر در آزمایشگاه پرداخته شده است. شاخص قابلیت حفاری معرفی شده در این مطالعات، به دلیل عدم لحاظ شرایط واقعی چاه‌ها، کاربردی نمی‌باشند؛ از اینرو، در مطالعه حاضر به توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ مخازن نفت و گاز سازگار با مدل نرخ نفوذ پرداخته خواهد شد. برای نیل به این هدف، پارامترهای عملیاتی، نگارهای پتروفیزیکی و گزارش‌های حفاری مربوط به چهار چاه از سه میدان مختلف گردآوری شد. ابتدا به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ، مدل‌سازی یک بعدی چاه انجام شد. به منظور انجام تحلیل‌های گسترده روی داده‌های گردآوری شده و درک ارزش پارامترهای سنگ در مدل‌های نرخ نفوذ، سطح اول داده‌ها مشتمل بر سه پایگاه داده مختلف تشکیل شد، که در پایگاه اول تنها پارامترهای عملیاتی هر چاه و در پایگاه دوم و سوم علاوه بر پارامترهای عملیاتی، به ترتیب، نگارهای پتروفیزیکی و ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ قرار دارند. از آنجایی که نتایج مدل‌های مبتنی بر داده‌های میدانی، بسیار وابسته به کیفیت برداشت این داده‌ها است، پیش‌پردازش به منظور کاهش اثر نوفه و انتخاب بهترین ویژگی‌های تأثیرگذار در نرخ حفاری روی داده‌ها اعمال شد. در این راستا؛ ابتدا، با استفاده از تحلیل طیفی و همبستگی خودکار وجود نوفه و شدت آن‌ها در داده‌ها ارزیابی شد. سپس با استفاده از صافی ساویتزکی-گولایی اثر نوفه در داده‌ها کاهش داده شد. در ادامه برای انتخاب ویژگی‌های برتر در تخمین نرخ حفاری، روش جستجوی افزودن l_1 حذف r روی پایگاه‌های داده سطح اول پیاده شد. به منظور ایجاد شرایط یکسان در تحلیل نتایج نرخ نفوذ، پنج پارامتر در هر پایگاه داده برای تخمین نرخ نفوذ مد نظر قرار گرفت. سپس مدل‌سازی نرخ نفوذ با استفاده از روش‌های رگرسیونی چند متغیره غیرخطی و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه و تنها با استفاده از پارامترهای انتخاب شده هر پایگاه داده انجام شد. بررسی نتایج مقادیر نرخ نفوذ تخمینی از مدل‌های حاصل از پایگاه‌های مختلف سطح اول داده‌ها نشان داد، که به صورت میانگین، دقت مدل‌های نرخ نفوذ پایگاه‌های شماره ۲ و ۳، به ترتیب، حدود ۷ و ۱۳ درصد در روش رگرسیونی، و ۱۳ و ۱۸ درصد در شبکه عصبی نسبت به پایگاه شماره ۱ بهبود یافته است. با توجه به این اهمیت ویژگی‌های سنگ در مدل‌های نرخ نفوذ، در ادامه، به منظور استخراج ویژگی‌های تردی و قابلیت حفاری سنگ، تعدادی آزمایش نفوذگر بر روی نمونه

مغزه‌های بدست آمده از سازندهای مشابه دو چاه انجام شد. از نمودارهای نیرو-نفوذ بدست آمده برای هر نمونه سنگ در این آزمایش، سه شاخص تردی و شاخص جدید توسعه داده شده با عنوان قابلیت حفاری سنگ محاسبه شد. بررسی ارتباط هر یک از این شاخص‌ها با نرخ نفوذ نشان داد؛ که شاخص توسعه داده شده ارتباط خوبی را به صورت نمایی با نرخ حفاری دارد. از اینرو، در ادامه از نگارهای پتروفیزیکی و ژئومکانیکی سنگ برای ارائه رابطه‌ای برای تخمین شاخص قابلیت حفاری سنگ استفاده شد. نتیجه این ارزیابی نشان داد که با دو ویژگی ژئومکانیکی سنگ یعنی مقاومت فشاری محصور شده و زاویه اصطکاک داخلی می‌توان با دقت خوبی شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ را برآورد نمود. از اینرو، این شاخص در همه چاه‌های مورد مطالعه محاسبه و سطح دوم پایگاه داده مشتمل بر پارامترهای عملیاتی و شاخص جدید قابلیت حفاری به تفکیک هر چاه ایجاد شد. به منظور اعتبار سنجی شاخص جدید قابلیت حفاری در مدل‌های نرخ نفوذ، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای انتخاب ویژگی‌های برتر روی داده‌های سطح دوم پیاده شد. استفاده از پارامترهای انتخاب شده سطح دوم هر چاه در مدل‌سازی نرخ حفاری نشان داد که، به صورت میانگین، دقت در روش رگرسیونی حدود ۱۶ درصد و در شبکه عصبی حدود ۲۸ درصد، نسبت به دقت مدل‌های نظیر پایگاه سوم سطح اول داده افزایش یافته است. همچنین مقایسه نتایج مدل رگرسیونی تخمین‌گر نرخ حفاری سطح دوم داده با مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ در چاه‌های مورد مطالعه نشان داد که دقت مدل‌های سطح دوم به طور میانگین حدود ۲۷ درصد بیشتر از مدل بورگوین و یانگ است. این در حالی است که مدل بورگوین و یانگ از نه پارامتر مختلف، و مدل‌های ارائه شده تنها از پنج پارامتر استفاده می‌کنند.

کلمات کلیدی: قابلیت حفاری سنگ، مدل نرخ نفوذ حفاری، آزمایش نفوذ نفوذگر، مدل‌سازی یک بعدی چاه، ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ، پیش‌پردازش داده

مقالات مستخرج

نشریات علمی-پژوهشی

1- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B. (2017), "Shear wave travel time estimation from petrophysical logs using ANFIS-PSO algorithm: A case study from Ab-Teymour Oilfield", *Journal of Natural Gas Science and Engineering* (38) 373-387.

2- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B. (2017), "Determination of constant coefficients of Bourgoyne and Young drilling rate model using a novel evolutionary algorithm", *Journal of Mining and environment*, (DOI:10.22044/jme.2017.842).

۳- محمد انه منگلی، احمد رمضانزاده، بهزاد تخمچی، عبدالله ملقب، آرام محمدیان، " تعیین قابلیت حفاری سنگ مخزن براساس نرخ نفوذ حفاری در یک چاه نفت در جنوب غرب ایران"، مجله ژئومکانیک نفت

مقالات کنفرانسی

۱- محمد انه منگلی، احمد رمضانزاده، بهزاد تخمچی، " تخمین موج برشی از نگارهای پتروفیزیکی با استفاده از روابط تجربی و شبکه عصبی MLP؛ مطالعه موردی: یکی از چاههای میدان نفتی آب- تیمور"، پنجمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک، مرکز همایشهای بین المللی برج میلاد تهران، آبان ۱۳۹۵.

۲- محمد انه منگلی، احمد رمضانزاده، بهزاد تخمچی، " تعیین وزن گل در عملیات حفاری مخزن با استفاده از دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون؛ مطالعه موردی: یکی از چاههای میدان نفتی کرنج"، پنجمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک، مرکز همایشهای بین المللی برج میلاد تهران، آبان ۱۳۹۵.

3- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., (2017), "Evaluation of the Effects of Geomechanical Parameters on Drilling Rate Using MLP-PSO Algorithm", *Second National Conference on Petroleum Geomechanics*, Jan. 24-27 2017, NIOC-Exploration Directorate, Tehran, Iran.

4- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., (2017), "Safe Mud Weight Window Determination using Log Based Methodology", *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*, 12-15 Jun, Paris, France

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مبانی پژوهش.....
۱-۱	۱-۱. مقدمه.....
۲	۲-۱. عوامل موثر بر نرخ حفاری.....
۲-۱-۱	۱-۲-۱. عوامل مکانیکی.....
۲-۱-۲	۲-۲-۱. خواص سیال حفاری.....
۲-۱-۳	۳-۲-۱. هیدرولیک مته.....
۲-۱-۴	۴-۲-۱. مشخصات سازند.....
۳-۱	۳-۱. قابلیت حفاری.....
۴-۱	۴-۱. آزمایش نفوذ.....
۵-۱	۵-۱. مکانیزم خردایش سنگ.....
۶-۱	۶-۱. ضرورت تحقیق.....
۷-۱	۷-۱. فرضیات پژوهش حاضر.....
۸-۱	۸-۱. اهداف تحقیق.....
۹-۱	۹-۱. روش انجام تحقیق.....
۱۰-۱	۱۰-۱. ساختار رساله.....
۱۵	فصل دوم: مرور پیشینه موضوع.....
۱-۲	۱-۲. مقدمه.....
۲-۲	۲-۲. مروری بر روابط نرخ نفوذ ارائه شده.....
۱-۲-۱	۱-۲-۱. مدل‌های رگرسیونی نرخ نفوذ.....
۲-۲-۲	۲-۲-۲. مدل‌های هوش مصنوعی نرخ نفوذ.....
۳-۲	۳-۲. مطالعات صورت گرفته برای تعیین قابلیت حفاری سازند.....
۴-۲	۴-۲. جمع‌بندی.....
۳۵	فصل سوم: میادین مورد مطالعه.....
۱-۳	۱-۳. مقدمه.....
۲-۳	۲-۳. داده‌های مورد نیاز پژوهش حاضر.....
۱-۲-۳	۱-۲-۳. ارزیابی اولیه اطلاعات چاه‌ها.....
۲-۲-۳	۲-۲-۳. راهکارهای رفع نواقص داده‌های دریافتی.....
۳-۳	۳-۳. معرفی چاه‌های مورد مطالعه.....
۱-۳-۳	۱-۳-۳. چاه AzA.....
۲-۳-۳	۲-۳-۳. چاه KrA.....
۳-۳-۳	۳-۳-۳. چاه RSA و RSB.....
۴-۳	۴-۳. جمع‌بندی.....
۴۳	فصل چهارم: مدل‌سازی یک بعدی چاه‌ها.....
۱-۴	۱-۴. مقدمه.....
۲-۴	۲-۴. فرآیند مدل‌سازی یک بعدی.....
۱-۲-۴	۱-۲-۴. داده‌های مورد نیاز.....

۴۷	..... تخمین موج برشی ۱-۲-۴
۵۶	..... نگارهای پتروفیزیکی مورد نیاز ۲-۲-۴
۵۷	..... استخراج ضرایب استاتیک سنگ ۳-۲-۴
۵۸	..... تخمین مقاومت سنگ ۴-۲-۴
۶۰	..... محاسبات فشار منفذی ۵-۲-۴
۶۱	..... تخمین مقاومت فشاری محصور شده ۶-۲-۴
۶۲	..... تخمین مقادیر تنش‌ها ۷-۲-۴
۶۳	..... تعیین تنش‌های برجا ۱-۷-۲-۴
۶۴	..... تعیین تنش‌های القایی ۲-۷-۲-۴
۶۵	..... تعیین پنجره ایمن وزن گل ۸-۲-۴
۶۶	..... معیار شکست موهر-کلمب ۱-۸-۲-۴
۶۷	..... معیار شکست هوک-برآون ۲-۸-۲-۴
۶۸	..... نتایج معیارهای شکست ۹-۲-۴
۶۹	..... جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۳-۴
۷۱	..... فصل پنجم: پیش پردازش داده‌ها و تشکیل بانک اطلاعاتی
۷۲	..... ۱-۵ مقدمه
۷۲	..... ۲-۵ همسان‌سازی مقیاس داده‌ها
۷۴	..... ۱-۲-۵ روش عکس مجذور فاصله
۷۶	..... ۲-۲-۵ میانگین‌گیری
۷۸	..... ۳-۵ مطابقت عمقی منابع اطلاعاتی مختلف
۷۹	..... ۴-۵ تشکیل پایگاه داده
۸۰	..... ۵-۵ تحلیل توصیفی پارامترهای مورد مطالعه
۹۰	..... ۶-۵ کاهش نوفه
۹۵	..... ۷-۵ بررسی هم‌خطی داده‌ها
۹۸	..... ۸-۵ انتخاب ویژگی
۱۰۲	..... ۹-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۰۵	..... فصل ششم: بررسی تأثیر پارامترهای سنگ بر نرخ حفاری با استفاده از مدل‌سازی نرخ نفوذ
۱۰۶	..... ۱-۶ مقدمه
۱۰۶	..... ۲-۶ تحلیل رگرسیونی
۱۰۶	..... ۱-۲-۶ رگرسیون دو متغیره
۱۰۷	..... ۱-۲-۶ نگارهای پتروفیزیکی
۱۰۸	..... ۲-۲-۶ ویژگی‌های سنگ
۱۰۹	..... ۳-۲-۶ پارامترهای گل‌نگاری
۱۱۰	..... ۲-۲-۶ رگرسیون چند متغیره غیرخطی
۱۱۴	..... ۳-۶ شبکه عصبی
۱۱۴	..... ۱-۳-۶ ساختار شبکه
۱۱۵	..... ۲-۳-۶ الگوریتم آموزش
۱۲۰	..... ۳-۳-۶ نتایج مدل
۱۲۴	..... ۴-۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۲۷	..... فصل هفتم: توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ

۱۲۸	۱-۷. مقدمه
۱۲۸	۲-۷. تعیین شاخص قابلیت حفاری مبتنی بر آزمایش نفوذ
۱۲۸	۱-۲-۷. مشخصات دستگاه نفوذ نفوذگر
۱۳۰	۲-۲-۷. روش انجام آزمایش و تحلیل نتایج
۱۳۲	۳-۲-۷. آماده‌سازی نمونه‌ها
۱۳۴	۴-۲-۷. نتایج
۱۳۸	۵-۲-۷. تخمین شاخص قابلیت حفاری از داده‌های درون چاهی
۱۴۵	۳-۷. تخمین RDI در چاه‌های مورد مطالعه
۱۴۷	۴-۷. تخمین نرخ نفوذ با استفاده از شاخص جدید
۱۵۰	۱-۴-۷. روش رگرسیون چند متغیره
۱۵۲	۲-۴-۷. شبکه عصبی پرسپترون چند لایه
۱۵۴	۵-۷. اعتبارسنجی مدل‌های نرخ نفوذ مبتنی بر شاخص جدید
۱۵۴	۱-۵-۷. آزمون مدل‌های نرخ نفوذ سطح دوم در چاه‌های دیگر
۱۵۶	۲-۵-۷. مقایسه بین مدل‌های نرخ نفوذ بورگوین و یانگ و شماره ۴
۱۵۸	۶-۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۶۱	فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۶۲	۱-۸. مقدمه
۱۶۲	۲-۸. نتیجه‌گیری
۱۶۶	۳-۸. پیشنهادات
۱۶۹	پیوست
۱۷۰	۱-۹. پیوست شماره ۱
۱۷۰	۱-۱-۹. چاه KrA
۱۸۲	۲-۱-۹. چاه RSA
۱۹۴	۳-۱-۹. چاه RSB
۲۰۵	۲-۹. پیوست شماره ۲
۲۰۶	۱-۲-۹. مرحله اول
۲۰۷	۲-۲-۹. مرحله دوم
۲۰۹	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱. پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ نفوذ (Gatlin, 1960) ۳
- شکل ۱-۲. رابطه بین (الف) نرخ حفاری و وزن روی مته و (ب) نرخ حفاری و سرعت دوران (Bourgoyne et al., 2003;) ۴
- شکل ۱-۳. ترسیم شماتیکی از دستگاه و نمونه مورد آزمایش در آزمایش نفوذ (Jeong et al., 2015) و (ب) تفسیرهای مختلف از نمودار نیرو نفوذ حاصل از آزمایش (Yagiz, 2009) ۹
- شکل ۱-۴. دو نوع مکانیزم عملکرد ابزار در سنگ: (الف) مکانیزم خراش و (ب) مکانیزم نفوذ (Ramezanzadeh and Hood, 2010) ۱۱
- شکل ۱-۲. مدل ناهمگن چند بعدی ما (Ma, 2011) ۲۹
- شکل ۲-۲. مراحل مختلف تعیین قابلیت حفاری سازند در مدل پیشنهادی ما (Ma, 2011) ۳۰
- شکل ۱-۳. موقعیت میداین اهواز، کرنج و رگ سفید نسبت به سایر میداین شرکت مناطق نفتخیز جنوب ۳۹
- شکل ۱-۴. مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه ۴۵
- شکل ۲-۴. مراحل تخمین کندی موج برشی برای چاه‌های مورد مطالعه ۴۸
- شکل ۳-۴. میانگین مربعات خطای بدست آمده به ازای مقادیر مختلف نرخ تقاطع (الف) و جهش (ب) ۵۱
- شکل ۴-۴. نمودار خطا و ضریب تعیین به ازای تعداد ورودی‌های مختلف برای چاه (الف) AT-Dt1 و (ب) Az-Dt1 ۵۲
- شکل ۵-۴. نرخ کاهش خطا در مرحله آموزش مدل با استفاده از داده‌های (الف): چاه AT-Dt1 و (ب) چاه Az-Dt1 ۵۴
- شکل ۶-۴. نمودار متقاطع کندی موج برشی تخمینی و اندازه‌گیری شده مرحله آموزش (الف): چاه AT-Dt1 و (ج): چاه Az-Dt1 و آزمون (ب): چاه AT-Dt1 و (د): چاه Az-Dt1) ۵۵
- شکل ۷-۴. نمودار کندی موج برشی تخمینی به همراه کندی موج فشاری در چاه‌های: (الف) RSB، (ب) RSA، (ج) KrA و (د) AzA ۵۶
- شکل ۸-۴. نگارهای پتروفیزیکی مورد استفاده برای مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه AzA ۵۶
- شکل ۹-۴. مقادیر ضرایب استاتیک و مقاومت سنگ تخمینی در محدوده عمقی مورد مطالعه در چاه AzA ۶۰
- شکل ۱۰-۴. مقادیر مقاومت فشاری محصور شده تخمینی برای چاه AzA ۶۲
- شکل ۱۱-۴. پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده براساس دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون برای چاه AzA ۶۹
- شکل ۱-۵. تصویری از ریزمقیاس‌نمایی و درشت‌مقیاس‌نمایی ۷۳
- شکل ۲-۵. مقایسه مقادیر ریزمقیاس (۰/۱۵۲۴) و درشت‌مقیاس شده (یک متر) خواص سنگ با استفاده از روش عکس مجذور فاصله در چاه AzA ۷۶
- شکل ۳-۵. مقایسه مقادیر ریزمقیاس (۰/۱۵۲۴) متر) و افزایش مقیاس یافته (یک متر) خواص سنگ در چاه KrA با استفاده از روش میانگین‌گیری ۷۷
- شکل ۴-۵. مقایسه نمودار جعبه‌ای (الف) عمق و (ب) کالیبر به تفکیک سازند و چاه ۸۴
- شکل ۵-۵. مقایسه نمودار جعبه‌ای نگارهای پتروفیزیکی به تفکیک سازند و چاه: (الف) مقاومت ویژه، (ب) گاما، (ج) چگالی، (د) تخلخل، (ه) کندی موج صوتی فشاری و (و) کندی موج صوتی برشی ۸۵
- شکل ۶-۵. مقایسه نمودار جعبه‌ای برخی از ویژگی‌های سنگ به تفکیک سازند و چاه: (الف) مدول یانگ، (ب) ضریب پواسون، (ج) زاویه اصطکاک داخلی، (د) مقاومت تک محوری و (ه) کششی و (و) فشاری محصور شده ۸۷

شکل ۵-۷. مقایسه نمودار جعبه‌ای پارامترهای عملیاتی به تفکیک سازند و چاه: (الف) چگالی جریان معادل، (ب) وزن روی مته، (ج) فشار پمپ، (د) نرخ جریان، (ه) گشتاور و (و) نرخ نفوذ ۱۸۹

شکل ۵-۸. تحلیل طیف دامنه (الف) مقاومت فشاری محصور شده و (ب) وزن روی مته در چاه AZA ۹۱

شکل ۵-۹. مقایسه بین نگارهای پتروفیزیکی نوفه‌زدایی شده و برداشت شده در چاه RSA ۹۳

شکل ۵-۱۰. مقایسه بین برخی ویژگی‌های سنگ نوفه‌زدایی شده با ویژگی‌های متناظر محاسبه شده از نگارهای پتروفیزیکی چاه RSA ۹۴

شکل ۵-۱۱. مقایسه بین برخی پارامترهای عملیاتی نوفه‌زدایی شده و برداشت شده در چاه RSA ۹۴

شکل ۶-۱. مقایسه نرخ نفوذ تخمینی در چاه AZA با استفاده از مدل‌های جدول ۶-۴: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ ۱۱۲

شکل ۶-۲. تحلیل باقیمانده با استفاده از نمودار Q-Q (شکل‌های سمت راست) و توزیع فراوانی (شکل‌های سمت چپ) برای: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ در چاه AZA ۱۱۳

شکل ۶-۳. مقایسه خطا و سرعت همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی فاخته، ژنتیک و ازدحام ذرات ۱۱۶

شکل ۶-۴. فرآیند حل مسئله با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته ۱۱۸

شکل ۶-۵. نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم فاخته: (الف) تعداد تکرار و (ب) جمعیت فاخته‌ها ۱۲۰

شکل ۶-۶. تغییرات خطا (RMSE) در تکرارهای مختلف الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با استفاده از پایگاه داده‌های مختلف چاه AZA ۱۲۱

شکل ۶-۷. نمودار متقاطع نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده نرمالیزه و نرخ نفوذ تخمینی نرمالیزه حاصل از مدل MLP-COA برای مرحله آموزش (الف، ج، و) و آزمون (ب، د، ه) با استفاده از پایگاه داده‌های چاه AZA ۱۲۳

شکل ۶-۸. مقایسه مقدار نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی با استفاده از مدل‌های ایجاد شده براساس پارامترهای انتخاب شده پایگاه داده: (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳ ۱۲۴

شکل ۷-۱. ابعاد لوله فولادی براساس ابعاد نمونه سنگ مورد آزمایش (Jeong et al., 2015) ۱۲۹

شکل ۷-۲. نمودار شماتیک نفوذکننده مورد استفاده در این مطالعه (ابعاد به میلی‌متر) (Jeong et al., 2015) ۱۳۰

شکل ۷-۳. دستگاه آزمایش و موقعیت مخروط نفوذکننده و کرنش‌سنج ۱۳۰

شکل ۷-۴. نمودار شماتیک نیرو-نفوذ حاصل از انجام آزمایش و نحوه تعیین شاخص‌های تردی ۱۳۱

شکل ۷-۵. نمونه‌های تهیه شده به منظور تعیین حداقل قطر لازم برای انجام آزمایش نفوذ: (الف) استوانه، (ب) نصف استوانه و (ج) یک چهارم استوانه ۱۳۳

شکل ۷-۶. نمودار نیرو-نفوذ حاصل از آزمایش نفوذ برای دو نمونه تهیه شده از چاه‌های (الف) KTA و (ب) چاه x ۱۳۵

شکل ۷-۷. نمودار متقابل نرخ نفوذ و شاخص‌های محاسبه شده از نمودار نیرو-نفوذ: (الف) BI1، (ب) BI2، (ج) BI3 و (د) RDI ۱۳۶

شکل ۷-۸. نمودار متقابل نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده با نرخ نفوذ تخمینی با استفاده از رابطه نمایی بدست آمده از شاخص‌های: (الف) BI1، (ب) BI2، (ج) BI3 و (د) RDI ۱۳۸

شکل ۷-۹. ارزیابی ارتباط هر یک از نگارهای پتروفیزیکی با شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ ۱۴۱

شکل ۷-۱۰. نمودار متقاطع قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی ۱۴۲

شکل ۷-۱۱. رابطه بین شاخص قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های سنگ (الف: حجم شیل، ب: ضریب پواسون، ج: زاویه اصطکاک داخلی و د: مقاومت فشاری محصور شده) با استفاده از توابع برازش مختلف ۱۴۴

شکل ۷-۱۲. نمودار متقاطع شاخص قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی ۱۴۵

- شکل ۷-۱۳. رابطه بین نرخ نفوذ و شاخص قابلیت حفاری تخمینی برای چاه‌های (الف) AZA، (ب) KrA، (ج) RSA و (د) RSB ۱۴۷
- شکل ۷-۱۴. نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته به منظور تعیین مقادیر بهینه جمعیت (الف) و تعداد تکرارها (ب) الگوریتم ژنتیک براساس داده‌های چاه AZA ۱۴۸
- شکل ۷-۱۵. نتایج الگوریتم انتخاب ویژگی برای داده‌های سطح دو چاه AZA ۱۴۹
- شکل ۷-۱۶. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی با استفاده از پارامترهای انتخاب شده از سطح دو چاه AZA ۱۵۱
- شکل ۷-۱۷. مقایسه نمودار (الف) q-q و (ب) توزیع فراوانی خطا ۱۵۱
- شکل ۷-۱۸. مقایسه نمودار متقاطع مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA حاصل از داده‌های سطح دوم چاه AZA ۱۵۳
- شکل ۷-۱۹. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی با شبکه عصبی بهینه شده از داده‌های سطح دو چاه AZA ۱۵۳
- شکل ۷-۲۰. بکارگیری مدل‌های آموزش دیده در چاه AZA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KrA ۱۵۵
- شکل ۷-۲۱. بکارگیری مدل‌های آموزش دیده در چاه RSA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KrA ۱۵۵
- شکل ۷-۲۲. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل بورگوین و یانگ برای چاه‌های (الف) AZA، (ب) KrA، (ج) RSA و (د) RSB ۱۵۸
- شکل ۹-۱. نگارهای پتروفیزیکی مورد استفاده برای مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه KrA ۱۷۰
- شکل ۹-۲. مقادیر ضرایب استاتیک و مقاومت سنگ تخمینی در محدوده عمقی مورد مطالعه در چاه KrA ۱۷۰
- شکل ۹-۳. پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده براساس دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون برای چاه KrA ۱۷۱
- شکل ۹-۴. مقایسه نرخ نفوذ تخمینی در چاه KrA با استفاده از داده‌های انتخاب شده پایگاه داده سطح اول: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ ۱۷۴
- شکل ۹-۵. تحلیل باقیمانده با استفاده از نمودار Q-Q (سمت راست) و توزیع فراوانی (سمت چپ) برای: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ در چاه KrA ۱۷۵
- شکل ۹-۶. تغییرات خطا در تکرارهای مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های داده سطح اول چاه KrA ۱۷۶
- شکل ۹-۷. نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های مختلف سطح اول چاه KrA برای مرحله آموزش (الف، ج، و) و آزمون (ب، د، ه) ۱۷۷
- شکل ۹-۸. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های سطح اول چاه KrA: پایگاه (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳ ۱۷۸
- شکل ۹-۹. نمودار تغییرات خطا و ضریب همبستگی به ازای تعداد ورودی انتخاب شده برای مدل تخمین‌گر نرخ نفوذ با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه KrA ۱۷۹
- شکل ۹-۱۰. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل شماره ۴ چاه KrA ۱۸۰
- شکل ۹-۱۱. نمودار (الف) Q-Q و (ب) توزیع فراوانی خطا برای مدل رگرسیونی شماره ۴ چاه KrA ۱۸۰
- شکل ۹-۱۲. نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نرمالیزه شده و تخمینی نرمالیزه شده با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه KrA در مرحله (الف) آموزش و (ب) آزمون ۱۸۱
- شکل ۹-۱۳. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل MLP-COA در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه KrA با داده‌های سطح دوم ۱۸۱
- شکل ۹-۱۴. نگارهای پتروفیزیکی مورد استفاده برای مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه RSA ۱۸۲
- شکل ۹-۱۵. مقادیر ضرایب استاتیک و مقاومت سنگ تخمینی در محدوده عمقی مورد مطالعه در چاه RSA ۱۸۳
- شکل ۹-۱۶. پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده براساس دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون برای چاه RSA ۱۸۳

- شکل ۹-۱۷. مقایسه نرخ نفوذ تخمینی در چاه RSA با استفاده از داده‌های انتخاب شده پایگاه داده سطح اول: (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳..... ۱۸۶
- شکل ۹-۱۸. تحلیل باقیمانده با استفاده از نمودار Q-Q (سمت راست) و توزیع فراوانی (سمت چپ) برای: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ در چاه RSA..... ۱۸۷
- شکل ۹-۱۹. تغییرات خطا در تکرارهای مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های داده سطح اول چاه RSA..... ۱۸۸
- شکل ۹-۲۰. نمودار مقاطع نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های مختلف سطح اول چاه RSA برای مرحله آموزش (الف، ج، و) و آزمون (ب، د، ه)..... ۱۸۹
- شکل ۹-۲۱. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های سطح اول چاه RSA: پایگاه (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳..... ۱۹۰
- شکل ۹-۲۲. نمودار تغییرات خطا و ضریب همبستگی مدل تخمین‌گر نرخ حفاری به ازای تعداد متغیرهای انتخابی با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه RSA..... ۱۹۱
- شکل ۹-۲۳. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل شماره ۴ چاه RSA..... ۱۹۲
- شکل ۹-۲۴. نمودار (الف) Q-Q و (ب) توزیع فراوانی خطا برای مدل رگرسیونی شماره ۴ چاه RSA..... ۱۹۲
- شکل ۹-۲۵. نمودار مقاطع نرخ نفوذ واقعی نرمالیزه شده و تخمینی نرمالیزه شده با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه RSA در مرحله (الف) آموزش و (ب) آزمون..... ۱۹۳
- شکل ۹-۲۶. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل MLP-COA در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه RSA با داده‌های سطح دوم..... ۱۹۳
- شکل ۹-۲۷. نگارهای پتروفیزیکی مورد استفاده برای مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه RSB..... ۱۹۴
- شکل ۹-۲۸. مقادیر ضرایب استاتیک و مقاومت سنگ تخمینی در محدوده عمقی مورد مطالعه در چاه RSB..... ۱۹۴
- شکل ۹-۲۹. پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده براساس دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون برای چاه RSB..... ۱۹۵
- شکل ۹-۳۰. مقایسه نرخ نفوذ تخمینی در چاه RSB با استفاده از داده‌های انتخاب شده پایگاه داده سطح اول: (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳..... ۱۹۸
- شکل ۹-۳۱. تحلیل باقیمانده با استفاده از نمودار Q-Q (سمت راست) و توزیع فراوانی (سمت چپ) برای: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ در چاه RSB..... ۱۹۹
- شکل ۹-۳۲. تغییرات خطا در تکرارهای مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های سطح اول چاه RSB..... ۲۰۰
- شکل ۹-۳۳. نمودار مقاطع نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های مختلف سطح اول چاه RSB برای مرحله آموزش (الف، ج، و) و آزمون (ب، د، ه)..... ۲۰۱
- شکل ۹-۳۴. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های سطح اول چاه RSB: پایگاه (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳..... ۲۰۲
- شکل ۹-۳۵. نمودار تغییرات خطا و ضریب همبستگی به ازای تعداد ورودی‌های انتخاب شده از داده‌های سطح دوم چاه RSB..... ۲۰۳
- شکل ۹-۳۶. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل شماره ۴ چاه RSB..... ۲۰۴
- شکل ۹-۳۷. نمودار (الف) Q-Q و (ب) توزیع فراوانی خطا برای مدل رگرسیونی شماره ۴ چاه RSB..... ۲۰۴
- شکل ۹-۳۸. نمودار مقاطع نرخ نفوذ واقعی نرمالیزه شده و تخمینی نرمالیزه شده با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه RSB در مرحله (الف) آموزش و (ب) آزمون..... ۲۰۵

شکل ۹-۳۹. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA در محدوده عمقی مورد مطالعاتی چاه RSB با داده‌های سطح دوم ۲۰۵

شکل ۹-۴۰. مقایسه میان مقادیر نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده (نوفه‌دار)، نوفه‌زدایی شده، تخمینی با داده‌های نوفه‌دار و تخمینی با داده‌های نوفه‌زدایی شده در چاه KfA ۲۰۷

شکل ۹-۴۱. مقایسه میان نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در سرچاه، نوفه‌زدایی شده، تخمینی با داده‌های نوفه‌دار و تخمینی با داده‌های نوفه‌زدایی شده در چاه RSA ۲۰۸

فهرست جداول

جدول ۱-۲. انواع پارامترهای به کار رفته در تحقیقات مختلف	۳۲
جدول ۱-۳. بررسی داده‌های مورد نیاز در چاه‌های معرفی شده	۳۷
جدول ۲-۳. نوع مته‌های استفاده شده در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه AZA	۳۹
جدول ۳-۳. نوع مته‌های استفاده شده در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه KrA	۴۰
جدول ۴-۳. نوع مته‌های استفاده شده براساس محدوده عمقی برای چاه‌های مورد مطالعه در میدان رگ‌سفید	۴۱
جدول ۱-۴. منابع اطلاعاتی رایج مورد استفاده در ساخت مدل مکانیکی زمین (Plumb et al., 2000)	۴۶
جدول ۲-۴. برخی از شاخص‌های آماری پارامترهای ورودی و خروجی در داده‌های دو چاه AT-Dt1 و Az-Dt1	۴۸
جدول ۳-۴. خروجی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای چاه AT-Dt1 (پارامترهای انتخاب شده پررنگ شدند)	۵۲
جدول ۴-۴. خروجی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای چاه Az-Dt1 (پارامترهای انتخاب شده پررنگ شدند)	۵۲
جدول ۵-۴. مقادیر خطا و ضریب تعیین مدل‌های آموزش دیده براساس اطلاعات دو چاه	۵۵
جدول ۶-۴. روابط تعیین ضرایب الاستیک دینامیکی سنگ (Fjaer et al., 2008; Nauroy, 2011; Zoback, 2007)	۵۷
جدول ۷-۴. روابط تخمین ضرایب الاستیک استاتیکی از نوع دینامیکی متناظر آن	۵۸
جدول ۸-۴. روابط تخمین مقاومت کششی سنگ براساس نوع سنگ و مقاومت تک محوری آن	۵۹
جدول ۹-۴. گرادیان فشار منفذی و فشار منفذی نقاط مبنا در هر چاه به تفکیک نوع سیال	۶۱
جدول ۱۰-۴. نحوه انتخاب رابطه مناسب برای تخمین اختلاف فشار ته چاه براساس تخلخل موثر (Caicedo et al., 2005; Calhoun and Ewy, 2009)	۶۲
جدول ۱۱-۴. روابط تعیین مقدار حداقل فشار گل مورد نیاز براساس معیار موهر-کلمب (Al-Ajmi, 2006)	۶۷
جدول ۱۲-۴. مقادیر پارامتر m برای انواع سنگ‌ها (Hoek and Brown, 1997)	۶۸
جدول ۱۳-۴. روابط تعیین مقدار حداقل فشار گل مورد نیاز براساس معیار هوک-براون (Gholami et al., 2014b)	۶۸
جدول ۱-۵. مقیاس ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در هر چاه و روش هم مقیاس‌سازی	۷۴
جدول ۲-۵. شبه کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB به منظور دستیابی به قدرت تفکیک ۰/۲ متر برای نگارهای چاه‌پیمایی (یا خواص سنگ)	۷۵
جدول ۳-۵. شبه کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB به منظور دستیابی به قدرت تفکیک یک متر برای نگارهای چاه‌پیمایی (یا خواص سنگ)	۷۷
جدول ۴-۵. جزئیات پایگاه‌های اطلاعاتی تشکیل شده	۷۹
جدول ۵-۵. پارامترهای دربرگیرنده هر یک از منابع اطلاعاتی مورد استفاده	۸۰
جدول ۶-۵. محدوده تغییرات نگارهای پتروفیزیکی اندازه‌گیری شده به تفکیک چاه‌ها	۸۱
جدول ۷-۵. محدوده تغییرات خواص سنگ به تفکیک چاه‌ها	۸۱
جدول ۸-۵. محدوده تغییرات پارامترهای عملیاتی به تفکیک چاه‌ها	۸۲
جدول ۹-۵. تعداد داده‌ها در هر چاه به تفکیک سازند	۸۳
جدول ۱۰-۵. مقادیر بهینه بدست آمده برای درجه چند جمله‌ای و تعداد نقاط بازه برای منابع اطلاعاتی مختلف در هر چاه	۹۲
جدول ۱۱-۵. ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه AZA (مقادیر همبستگی‌های شدید پررنگ شده‌اند)	۹۶

- جدول ۵-۱۲. ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه AZA (همبستگی‌های شدید پررنگ شدند) ۹۷
- جدول ۵-۱۳. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه AZA (مقادیر همبستگی شدید پررنگ شده‌اند) ۹۸
- جدول ۵-۱۴. شبه کد الگوریتم جستجوی افزودن l، حذف r در حالت غلبه جستجوی مستقیم ترتیبی ۱۰۱
- جدول ۵-۱۵. ویژگی‌های انتخاب شده برای تخمین نرخ نفوذ با استفاده از روش جستجوی افزودن l، حذف r برای سطح اول پایگاه‌های داده ۱۰۲
- جدول ۶-۱. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و نگارهای پتروفیزیکی چاه AZA ۱۰۸
- جدول ۶-۲. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و ویژگی‌های ژئومکانیکی چاه AZA ۱۰۹
- جدول ۶-۳. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و پارامترهای عملیاتی چاه AZA ۱۱۰
- جدول ۶-۴. مدل‌های رگرسیونی حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی روی داده‌های انتخاب شده (مدل ۱: پایگاه داده شماره ۱، مدل ۲: پایگاه داده شماره ۲ و مدل ۳: پایگاه داده شماره ۳ سطح اول) ۱۱۱
- جدول ۶-۵. ساختار شبکه انتخابی برای هر چاه با استفاده از روش آزمون و خطا ۱۱۵
- جدول ۶-۶. مقایسه پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی پرسپترون چند لایه ۱۱۶
- جدول ۶-۷. نتایج تحلیل حساسیت روی پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته براساس اطلاعات چاه‌های مورد مطالعه ۱۲۰
- جدول ۶-۸. مقایسه مدل‌های ایجاد شده براساس مقادیر خطا و ضریب تعیین بدست آمده در دو مرحله آموزش و آزمون براساس پایگاه داده مختلف چاه AZA ۱۲۱
- جدول ۶-۹. مقایسه خطای مدل‌های رگرسیونی در چاه‌های مختلف مورد مطالعه ۱۲۵
- جدول ۶-۱۰. مقایسه خطای مدل‌های شبکه عصبی سطح اول پایگاه داده در چاه‌های مختلف مورد مطالعه ۱۲۶
- جدول ۷-۱. اطلاعات کلی مربوط به نمونه‌های تهیه شده از دو چاه ۱۳۴
- جدول ۷-۲. مقادیر شاخص‌های مختلف بدست آمده از نمودار نیرو-نفوذ برای هر نمونه به همراه نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در زمان حفاری چاه ۱۳۵
- جدول ۷-۳. مقایسه مدل‌های نمایی و توانی برازش شده برای تخمین نرخ نفوذ از شاخص‌های مستخرج ۱۳۷
- جدول ۷-۴. مقادیر نگارهای پتروفیزیکی و شاخص قابلیت حفاری در نقاط عمقی متناظر با نمونه‌های تهیه شده ۱۳۹
- جدول ۷-۵. مقادیر ویژگی‌های ژئومکانیکی و شاخص قابلیت حفاری در نقاط عمقی متناظر با نمونه‌های تهیه شده ۱۴۰
- جدول ۷-۶. مقادیر ضرایب تعیین، سطح معنی‌داری و خطای مدل رگرسیونی برازش شده با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی ۱۴۲
- جدول ۷-۷. مقادیر ضرایب تعیین، سطح معنی‌داری و خطای مدل رگرسیونی برازش شده با استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی ۱۴۵
- جدول ۷-۸. نتیجه اعمال الگوریتم انتخاب ویژگی روی داده‌های سطح دوم چاه AZA (ویژگی‌های انتخاب شده با خط پررنگ نمایش داده شده است) ۱۵۰
- جدول ۷-۹. مدل حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح دو چاه AZA ۱۵۱
- جدول ۷-۱۰. نتایج حاصل از اعمال شبکه عصبی بهینه شده بر روی داده‌های سطح دو چاه AZA ۱۵۲
- جدول ۷-۱۱. نتایج حاصل از مدل‌های آموزش دیده در چاه AZA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KfA ۱۵۴
- جدول ۷-۱۲. نتایج حاصل از مدل‌های آموزش دیده در چاه RSA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KfA ۱۵۵
- جدول ۷-۱۳. مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای الگوریتم فاخته بر مبنای روش آزمون و خطا ۱۵۷
- جدول ۷-۱۴. مقادیر ضرایب ثابت مدل بورگوبین و یانگ حاصل از الگوریتم فاخته به تفکیک سازندهای هر چاه ۱۵۷
- جدول ۷-۱۵. مقایسه خطای مدل شماره ۴ با مدل‌های شماره ۳ و بورگوبین و یانگ در چاه‌های مورد مطالعه ۱۶۰

جدول ۷-۱۶. مقایسه خطای مدل‌های شبکه عصبی حاصل از پایگاه داده سطح دوم و پایگاه داده سوم سطح اول در چاه‌های مورد مطالعه.....	۱۶۰
جدول ۸-۱. شرایط مورد نیاز به منظور استفاده از رابطه ۸-۱ در چاه‌های مورد بررسی.....	۱۶۵
جدول ۹-۱. ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه KrA.....	۱۷۱
جدول ۹-۲. ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه KrA.....	۱۷۲
جدول ۹-۳. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه KrA.....	۱۷۲
جدول ۹-۴. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و نگارهای پتروفیزیکی چاه KrA.....	۱۷۳
جدول ۹-۵. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و ویژگی‌های ژئومکانیکی چاه KrA.....	۱۷۳
جدول ۹-۶. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و پارامترهای عملیاتی چاه KrA.....	۱۷۳
جدول ۹-۷. مدل‌های حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح اول چاه KrA.....	۱۷۴
جدول ۹-۸. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA برای پایگاه‌های داده‌های سطح اول چاه KrA.....	۱۷۶
جدول ۹-۹. نتیجه اعمال الگوریتم انتخاب ویژگی روی داده‌های سطح دوم چاه KrA (ویژگی‌های انتخاب شده با خط پرننگ نمایش داده شده است).....	۱۷۹
جدول ۹-۱۰. مدل حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح دو چاه KrA.....	۱۷۹
جدول ۹-۱۱. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA براساس داده‌های سطح دوم چاه KrA.....	۱۸۰
جدول ۹-۱۲. ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه RSA.....	۱۸۴
جدول ۹-۱۳. ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه RSA.....	۱۸۴
جدول ۹-۱۴. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه RSA.....	۱۸۴
جدول ۹-۱۵. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و نگارهای پتروفیزیکی چاه RSA.....	۱۸۵
جدول ۹-۱۶. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و ویژگی‌های ژئومکانیکی چاه RSA.....	۱۸۵
جدول ۹-۱۷. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و پارامترهای عملیاتی چاه RSA.....	۱۸۵
جدول ۹-۱۸. مدل‌های حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح اول چاه RSA.....	۱۸۶
جدول ۹-۱۹. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA برای پایگاه‌های داده‌های سطح اول چاه RSA.....	۱۸۸
جدول ۹-۲۰. نتیجه اعمال الگوریتم انتخاب ویژگی بر روی داده‌های سطح دوم چاه RSA (ویژگی‌های انتخاب شده با خط پرننگ نمایش داده شده است).....	۱۹۱
جدول ۹-۲۱. مدل حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح دو چاه RSA.....	۱۹۱
جدول ۹-۲۲. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA براساس داده‌های سطح دوم چاه RSA.....	۱۹۲
جدول ۹-۲۳. ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه RSB.....	۱۹۵
جدول ۹-۲۴. ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه RSB.....	۱۹۶
جدول ۹-۲۵. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه RSB.....	۱۹۶
جدول ۹-۲۶. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و نگارهای پتروفیزیکی چاه RSB.....	۱۹۷
جدول ۹-۲۷. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و ویژگی‌های ژئومکانیکی چاه RSB.....	۱۹۷
جدول ۹-۲۸. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و پارامترهای عملیاتی چاه RSB.....	۱۹۷
جدول ۹-۲۹. مدل‌های حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های چاه RSB.....	۱۹۸
جدول ۹-۳۰. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA برای پایگاه‌های سطح اول چاه RSB.....	۲۰۰

- جدول ۹-۳۱. نتیجه اعمال الگوریتم انتخاب ویژگی بر روی داده‌های سطح دوم چاه RSB (ویژگی‌های انتخاب شده با خط پررنگ نمایش داده شده است)..... ۲۰۳
- جدول ۹-۳۲. مدل حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح دو چاه RSB..... ۲۰۳
- جدول ۹-۳۳. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA براساس داده‌های سطح دوم چاه RSB..... ۲۰۴
- جدول ۹-۳۴. مقایسه دو مدل آموزش دیده با استفاده از داده‌های نوفه‌دار و نوفه‌زدایی شده چاه KrA براساس مقادیر خطا و ضریب تعیین..... ۲۰۶
- جدول ۹-۳۵. مقایسه نتایج بکارگیری دو مدل چاه KrA بر روی داده‌های نوفه‌دار و نوفه‌زدایی شده چاه RSA..... ۲۰۷

فصل اول: مبانی پژوهش

۱-۱. مقدمه

حفاری سازندها یکی از مراحل اولیه و مهم تولید نفت، گاز طبیعی، آب و مواد معدنی است. احداث چاهها همواره مستلزم عبور از سازندهای مختلف تشکیل دهنده زمین است. این سازندها از سنگهای بسیار نرم تا بسیار سخت تشکیل شدهاند. حفاری سریع و کم هزینه این سازندها به منظور دستیابی به منابع نفتی، آبی و گازی در کمترین زمان ممکن، همیشه از دغدغه‌های مهندسين و شرکتهای حفاری بوده است؛ از اینرو، مهندسين حفاری برای توصیف ویژگی‌های سازندها از پارامترهای نرخ حفاری و قابلیت حفاری استفاده می‌کنند (Bourgoyne et al., 1991).

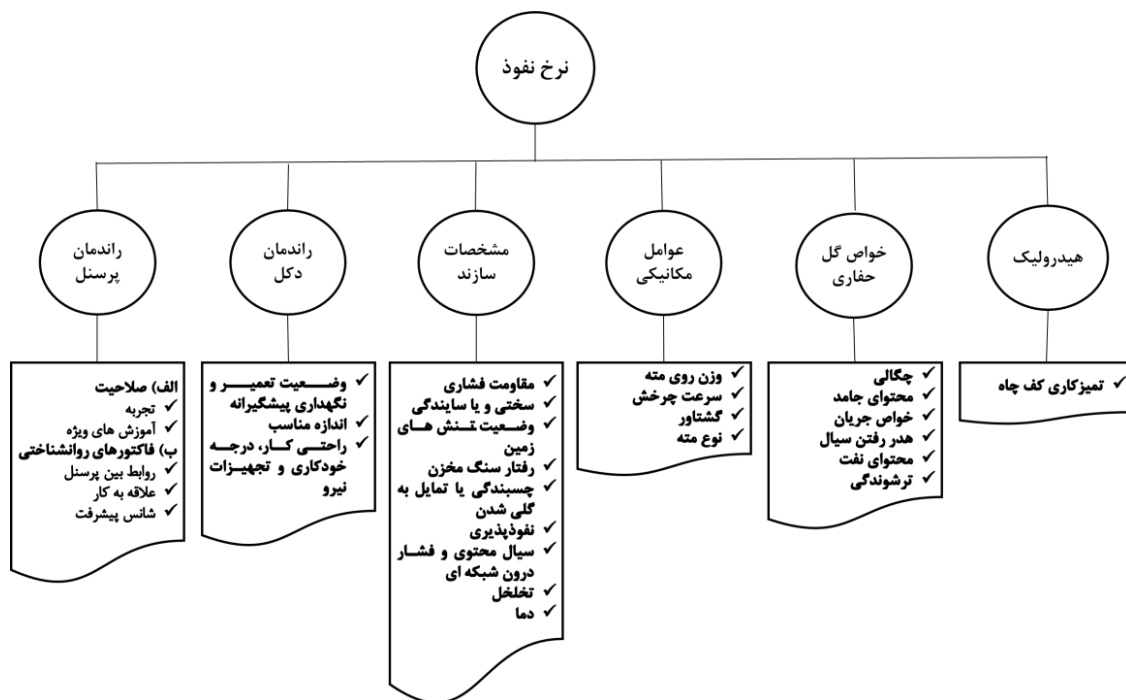
نرخ نفوذ یا نرخ حفاری فاصله حفر شده در واحد زمان می‌باشد. اهمیت نرخ نفوذ مدت زمان زیادی است که توسط مهندسين حفاری نفت شناسایی شده است. در حقیقت هزینه حفاری یک چاه ۷۵ درصد هزینه کل چاه است (Warren and Schabarum, 1946). از طرفی اکثر هزینه‌های حفاری وابسته به زمان است؛ از اینرو، هزینه‌های حفاری با افزایش عمق به صورت نمایی رشد می‌کنند (Abdel-Aal and Alsahlawi, 2013). روشی که موجب افزایش نرخ نفوذ شود؛ هزینه‌های حفاری را کاهش خواهد داد. افزایش سرعت حفاری نیازمند مدل تخمین‌گر نرخ نفوذ است. تخمین دقیق و صحیح نرخ نفوذ، علاوه بر افزایش سرعت حفاری، می‌تواند منجر به برنامه‌ریزی بهتر فرآیند حفاری و کاهش مخاطرات طبیعی شود. آگاهی کامل از پارامترهایی که بر روی نرخ نفوذ تأثیر می‌گذارند؛ قبل از مدل‌سازی نرخ نفوذ ضروری است (Head, 1951). لذا در ادامه به پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ نفوذ و نحوه تأثیر آنها بر نرخ نفوذ پرداخته خواهد شد.

۱-۲. عوامل موثر بر نرخ حفاری

عوامل شناخته شده تأثیرگذار بر نرخ نفوذ به دو گروه قابل کنترل و غیرقابل کنترل تقسیم می‌شوند. عوامل قابل کنترل، عواملی هستند که می‌توان مقادیر آنها را در هر زمان به دلخواه تغییر داد. وزن روی مته، سرعت دوران و هیدرولیک نمونه‌های از این نوع عوامل می‌باشند. در مقابل، عوامل محیطی یا به عبارت دیگر عوامل غیرقابل کنترل همانند مشخصات سازند و چگالی سیال حفاری، عواملی هستند که مقادیر آنها را به دلخواه نمی‌توان تغییر داد. ایجاد فشار به وسیله سیال حفاری به منظور عدم جریان سیال سازندی به درون چاه و حفظ پایداری دیواره چاه دلیلی است که به واسطه آن چگالی سیال حفاری به عنوان یک عامل غیرقابل کنترل لحاظ شده است.

عوامل متعددی بر نرخ نفوذ تأثیرگذار هستند و مطمئناً نحوه تأثیر همه آنها بر روی نرخ حفاری به طور کامل شناخته شده نیست. مطالعه دقیق نرخ حفاری به دلیل سخت بودن بررسی جداگانه هر کدام از این پارامترها، بسیار پیچیده است. برای مثال، تفسیر داده‌های میدانی به علت احتمال وجود تغییرات شناسایی نشده در خواص سنگ، با عدم قطعیت همراه است. ارزیابی تأثیر سیال حفاری به دلیل عدم تشابه خواص سیال حفاری تهیه شده در آزمایشگاه با سیال حفاری میدانی، همواره همراه با خطا است (Alum and Egbon, 2011).

عموماً افزایش نرخ نفوذ مطلوب است؛ اما، رسیدن به این هدف نبایستی همراه با هزینه زیاد باشد. سریع‌ترین نرخ نفوذ در ته چاه الزاماً منتج به کم‌ترین هزینه به ازای هر فوت حفاری نمی‌شود؛ عوامل دیگری مانند نرخ ساییده شدن مته، خرابی تجهیزات و غیره ممکن است موجب افزایش هزینه شود (Paيمان et al., 2009). برخی از پارامترهای موثر شناخته شده بر روی نرخ نفوذ در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



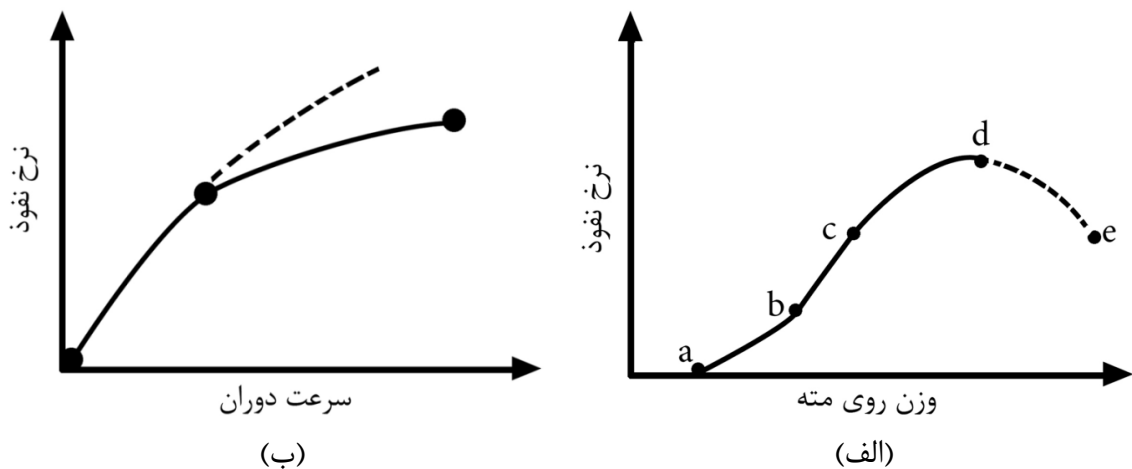
شکل ۱-۱. پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ نفوذ (Gatlin, 1960)

معمولاً عوامل کنترل کننده نرخ نفوذ به صورت پیچیده و غیرخطی عمل می‌کنند، یعنی افزایش یکی ممکن است باعث کاهش دیگری شود. به عنوان مثال افزایش وزن روی مته ممکن است در برخی موارد موجب افزایش نرخ نفوذ شود اما این امر ممکن است موجب سائیدگی سریع مته شود. این امر در دراز مدت موجب کاهش نرخ نفوذ خواهد شد. این تأثیر متقابل عوامل روی یکدیگر، بهینه‌سازی

عملیات حفاری را دشوار می‌سازد (Alum and Egbon, 2011). در ادامه برخی از مهمترین عوامل موثر بر نرخ نفوذ به صورت مختصر بررسی خواهند شد.

۱-۲-۱. عوامل مکانیکی

وزن روی مته و سرعت دوران دو پارامتر کلیدی قابل کنترل در زمان حفاری برای تنظیم سرعت حفاری است. در شکل ۱-۲ (الف) رابطه معمول نرخ حفاری با وزن روی مته حاصل از نتایج آزمایشگاهی با فرض ثابت بودن سایر پارامترهای حفاری نشان داده شده است. تا قبل از رسیدن وزن روی مته به مقدار آستانه (نقطه a) نرخ حفاری قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. سپس، نرخ نفوذ با افزایش وزن روی مته افزایش می‌یابد (بخش a-c)؛ اما، در ادامه با افزایش بیشتر وزن روی مته نرخ نفوذ با شیب کمی افزایش می‌یابد (بخش d-e). واکنش ضعیف نرخ حفاری در مقادیر بالای وزن روی مته معمولاً مرتبط با تمیزی نامناسب ته چاه با توجه به نرخ بالای خرده‌های حفاری تولیدی است. البته در این مقادیر وزن روی مته، احتمال سائیدگی دندان‌ها مته بسیار بالا است (Bourgoyne et al., 2003).



شکل ۱-۲. رابطه بین (الف) نرخ حفاری و وزن روی مته و (ب) نرخ حفاری و سرعت دوران (Bourgoyne et al., 2003; Osgouei and Özbayoğlu, 2007)

در شکل ۱-۲ (ب) منحنی عمومی نرخ نفوذ در مقابل سرعت دوران قابل مشاهده است. این منحنی با فرض عدم تغییر مقادیر سایر پارامترهای حفاری بدست آمده است. در ابتدا، نرخ نفوذ با افزایش سرعت دوران به صورت خطی افزایش می‌یابد. مقدار نرخ نفوذ بعد از اندازه معینی، با شتاب کمتری افزایش می‌یابد. مقادیر بالای سرعت دوران تأثیر کمتری را روی نرخ نفوذ می‌گذارد. واکنش ضعیف نرخ نفوذ در مقادیر بالای سرعت دوران در اکثر موارد به پایداری کم دیواره چاه نسبت داده می‌شود.

انتخاب مته مناسب برای عملیات حفاری نیز تأثیر زیادی روی نرخ نفوذ دارد. برای عمق‌های کم، جایی که ممکن است به سازند نرم برخورد شود؛ مته‌هایی با کاج گردنده همراه با دندانه‌های دراز و زاویه بزرگ آفست مخروط، عملکرد مناسبی خواهد داشت. از آنجایی که مشخصه اصلی این مته‌ها، سائیدگی سریع دندانه‌ها در سنگ‌های سخت است؛ این نوع مته‌ها فقط برای سازندهای نرم قابل استفاده می‌باشند (Bourgoyne et al., 1991). مته‌های الماسی یا ¹PDC، که براساس اندازه و تعداد الماس‌ها یا فاصله PDC طراحی می‌شوند؛ بیشتر برای سازندهای نیمه سخت، سخت و غیرساینده قابل استفاده می‌باشند. با سائیدگی دندانه مته‌ها، نرخ حفاری کاهش می‌یابد و این اثر برای مته‌های دندانه فولادی² بیشتر از مته‌های دکمه‌ای³ است. دو نوع مکانیزم خردایش؛ یعنی نفوذ و خراش، برای مته‌های حفاری در حوزه نفت و گاز تعریف شده است. دندانه‌های تنگستن کاربرد نوع دکمه‌ای و مته‌های PDC با عمل مکانیزم نفوذ به جای مکانیزم خراش سنگ را می‌شکنند و معمولاً تمام دندانه‌ها در فرآیند خردایش از بین می‌روند (Devereux, 1999).

۱-۲-۲. خواص سیال حفاری

با افزایش چگالی، گرانروی و محتوای جامد سیال حفاری، نرخ نفوذ کاهش می‌یابد و نیز رابطه مستقیمی بین نرخ نفوذ و نرخ فیلتراسیون وجود دارد. چگالی، محتوای جامد و خصوصیات فیلتراسیون گل حفاری اختلاف فشار ناحیه خرد شده در زیر مته را کنترل می‌کند. گرانروی سیال حفاری افت فشار اصطکاکی داخل رشته حفاری و بنابراین، انرژی هیدرولیکی در دسترس در نازل مته برای تمیزی ته چاه را کنترل می‌کند. شواهد آزمایشگاهی نیز وجود دارد که نشان می‌دهد؛ افزایش گرانروی، با وجود تمیزی کامل مته، نرخ نفوذ حفاری را کاهش می‌دهد. ترکیب شیمیایی سیال حفاری نیز، به دلیل تأثیر روی نرخ هیدراسیون و تمایل به گلی کردن مته⁴ برخی رس‌ها، بر روی نرخ حفاری تأثیرگذار است (Gatlin, 1960). از میان خواص سیال حفاری، چگالی تأثیر بیشتری نسبت به سایر پارامترها روی نرخ نفوذ دارد (Eren and Ozbayoglu, 2010). افزایش در چگالی سیال حفاری منجر به افزایش در فشار ته چاه می‌شود؛ که در نتیجه آن فشار تفاضلی بین فشار درون چاه و فشار سیال سازندی افزایش می‌یابد. این فشار تفاضلی بالا منجر به کاهش نرخ نفوذ حفاری می‌شود (Bourgoyne et al., 2003).

¹ Polycrystalline Diamond Compact

² Milled tooth bit

³ Insert bit

⁴ Bit balling

۱-۲-۳. هیدرولیک مته

بهبود چشمگیری با عمل صحیح نازل مته در نرخ نفوذ حفاری حاصل می‌شود. عمل بهبود یافته نازل منجر به تمیزی بهتر ته چاه و همچنین تمیزی مته می‌شود. همیشه عدم قطعیت در انتخاب بهترین پارامتری که تأثیر هیدرولیک را روی نرخ نفوذ بیان نماید وجود داشته است. معمولاً، قدرت اسب بخار هیدرولیکی مته، نیروی ضربه نازل و عدد رینولدز پارامترهایی برای توصیف تأثیر هیدرولیک مته روی نرخ نفوذ بوده‌اند.

۱-۲-۴. مشخصات سازند

ویژگی‌های ژئومکانیکی سازندهای زمین‌شناسی، به عنوان یک عامل غیرقابل کنترل در فرآیند حفاری، تأثیر زیادی روی نرخ نفوذ دارد (Walker et al., 1959; Somerton, 1959; Gstalder and Raynal, 2013). به طوری که دانش دقیق از ویژگی‌های سنگ برای بهینه‌سازی حفاری و پیش‌بینی نرخ نفوذ ضروری است (Shirkavand et al., 2009). بسته به موقعیت جغرافیایی محل حفاری، انواع سازندهای زمین‌شناسی با خواص مختلف سنگ از قبیل سختی، مقاومت، محتوای کانی، نفوذپذیری، فشار منفذی و غیره بر روی مقدار نرخ نفوذ تأثیرگذار است که نقش هیچ یک از آن‌ها را نمی‌توان در زمان طراحی عملیات حفاری نادیده گرفت. مشخصات سازند نقش بسزایی در انتخاب مته مناسب و همچنین در تعیین پنجره ایمن وزن گل حفاری، مقادیر وزن روی مته و سرعت دوران قابل استفاده دارد (Bourgoyne et al., 1991).

از ویژگی‌های سازند، مقاومت نهایی تأثیر بیشتری بر روی نرخ نفوذ دارد. در بسیاری از تحقیقات از مقاومت فشاری تک محوره به عنوان شاخص قابلیت حفاری سنگ استفاده شده است. اتحادیه بین المللی پیمانکاران حفاری^۱ نیز برای طبقه‌بندی مته‌های حفاری تنها از مقاومت فشاری تک محوری سنگ استفاده کرده است. هرچند مقاومت فشاری سه محوره محصور شده^۲ نشان داد که ارتباط بهتری با نرخ نفوذ دارد.

در سنگ‌های نفوذپذیر، سیال حفاری می‌تواند به راحتی در سنگ پیش روی مته نفوذ کرده و جریان یابد. حصول سریع تعادل تفاضلی فشار در ته چاه، وابسته به تجمع و پاکسازی خرده‌های حفاری خواهد بود. تعادل فشاری همچنین وابسته به نوع فاز سیال منفذی است، به طور مثال حضور مایع یا

¹ International Association of Drilling Contractors (IADC)

² Confined Compressive Strength

گاز به شکل‌های مختلف روی نرخ نفوذ تأثیرگذار است. در صورتی که گاز در سازند وجود داشته باشد نیاز به فیلتراسیون بیشتری برای برقراری تعادل می‌باشد (Bourgoyne et al., 1991).

در خصوص محتوای کانی‌های سنگ می‌توان گفت که وجود کانی‌های سخت و ساینده منجر به سائیدگی سریع دندان‌های مته و در نتیجه کاهش کارایی فرآیند حفاری می‌شود. وجود سنگ‌هایی با کانی‌های رسی نیز می‌تواند منجر به بروز مشکل گلی شدن مته و ناکارآمدی مته حفاری شود.

امروزه برای ارزیابی تأثیر ویژگی‌های سنگ بر روی نرخ نفوذ، از شاخص قابلیت حفاری یا حفرپذیری استفاده می‌کنند. قابلیت حفاری توده سنگ در انتخاب روش حفاری مناسب، انتخاب مته مناسب، پیش‌بینی نرخ حفاری و تعیین عمر مته بسیار مهم است (Hoseinie et al., 2009; Kahraman et al., 2000; Morris, 1969; Persson et al., 1993; Shrivastava et al., 2013).

۳-۱. قابلیت حفاری

قابلیت حفاری^۱ و یا حفرپذیری^۲ یکی از جنبه‌های بسیار مهم برنامه‌ریزی و طراحی حفاری یک چاه جدید نفتی یا گازی است. قابلیت خردایش سنگ در فرآیند حفاری، با استفاده از شاخص‌های مختلفی از جمله قابلیت حفاری (زمان حفاری یک متر از چاه)، سختی حفاری^۳ (شاخصی بدون بعد) و شدت انرژی^۴ قابل ارزیابی است (Tanaino, 2005). سمرتن و همکاران (Somerton et al., 1969) قابلیت حفاری سنگ را به عنوان مقدار سنگ حفاری شده به ازای واحد انرژی ورودی تعریف کردند. اورتن (Overton, 1973) قابلیت حفاری را به عنوان نرخی از نفوذ در سنگ معین تعریف نمود. به بیان ساده‌تر قابلیت حفاری سازند، میزان سهولت حفر آن سازند است. قابلیت حفاری مطابق تعریف آلبرتین و همکاران (Albertin et al., 2003) شاخصی از پیچیدگی حفاری، عملکرد حفاری و هزینه حفاری است. قابلیت حفاری سنگ از پارامترهای زیادی تأثیر می‌پذیرد (Black et al., 2008; Kahraman and Alber, 2006; Prasad, 2009; Prikryl, 2001; Reckmann et al., 2007; Thuro Prasad, and Plinninger, 2003)؛ که در صنعت حفاری به ندرت به این قضیه توجه شده است (2009). در حفاری‌های اکتشافی و استخراج نفت و گاز، قابلیت حفاری سازند اهمیت بالایی دارد و می‌توان از آن به عنوان یک راهنما در انتخاب مته، طراحی فن‌آوری حفاری چاه، بهینه‌سازی پارامترهای مته، طراحی عملیات حفاری، پیش‌بینی سرعت حفاری و طبقه‌بندی سنگ استفاده نمود

¹ Drillability

² Boreability

³ Drilling difficulty

⁴ Energy intensity

Gstalter and Raynal, 2013; Iqbal, 2008; Ma, 2011; Macini et al., 2007, 2005; Singh et al., 2006; Somerton et al., 1969; Tao et al., 2014).

اصولاً سنگ با ایجاد شکاف و گسترش شکستگی خرد می‌گردد (عمدتاً سنگ با ترک‌های کششی می‌شکند) لذا پارامترهایی از سنگ که در این دو پدیده موثر هستند؛ در تعیین قابلیت حفاری سنگ بسیار مهم می‌باشند. این پارامترها شامل مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، شکنندگی، چغرمگی¹ و سختی می‌باشند. آزمایش‌های استاندارد برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری تک محوره و کششی وجود دارد؛ اما در این بین هنوز آزمایش استاندارد برای اندازه‌گیری تردی تعریف نشده است (Altindag and Guney, 2010; Yagiz, 2009). از طرفی اندازه‌گیری چغرمگی، که یکی از پارامترهای پایه در مکانیک شکست است، نسبت به آزمایش‌های همچون مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی سخت‌تر است (Kahraman and Altindag, 2004). لذا محققان بسیاری سعی در ارائه روش اندازه‌گیری چغرمگی و شکنندگی و نیز به یافتن رابطه‌ای بین آن‌ها پرداختند (Altindag and Guney, 2010; Hucka and Das, 1974; Yarali and Kahraman, 2011). بسیاری از محققان آزمایش نفوذ را برای اندازه‌گیری شکنندگی و چغرمگی سنگ پیشنهاد کردند و کاربرد آن را در خردایش سنگ، با ابزار مکانیکی مناسب، ارزیابی نمودند (Dollinger et al., 1998; Ramezanzadeh et al., 2008; Yagiz, 2008; Mansouri and Moomivand, 2010; Yagiz, 2009). مقایسه با سایر آزمایش‌های اندازه‌گیری چغرمگی کارآمد و در عین حال کم هزینه می‌باشد (Yagiz, 2009).

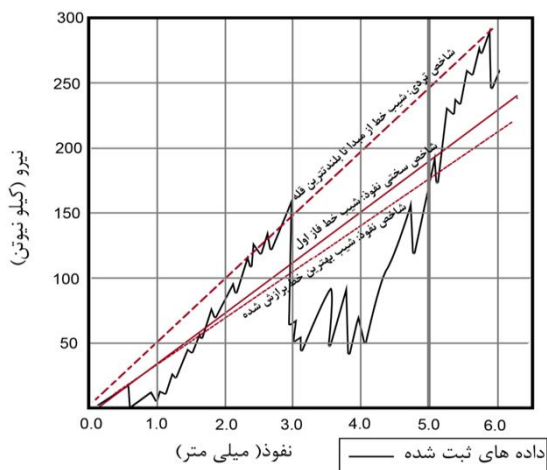
به کارگیری آزمون نفوذ نفوذگر² نشان داد که می‌تواند در اندازه‌گیری بسیاری از خواص سنگ، که در تعیین قابلیت حفاری موثر هستند، ارزشمند باشد؛ در حالی که برای اندازه‌گیری بسیاری از این پارامترها ابزارهای آزمایشگاهی خاصی وجود ندارد (Dollinger et al., 1998). با توجه به این که شکنندگی نقش مهمی را در فرآیند خردایش سنگ ایفا می‌کند (Goktan and Yilmaz, 2005) این آزمایش می‌تواند ابزار مناسبی برای تعیین قابلیت حفرپذیری و برش‌پذیری سنگ باشد (Dollinger et al., 1998; Yagiz et al., 2009). با توجه به اهمیت این آزمون، در ادامه این آزمایش به اختصار بررسی می‌شود.

¹ Toughness

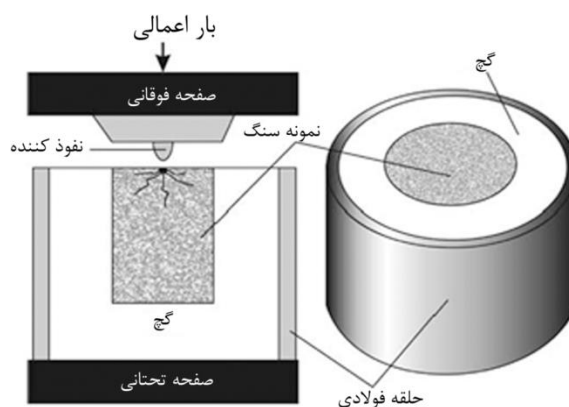
² Punch penetration test

۴-۱. آزمایش نفوذ

آزمایش نفوذ در اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی برای اندازه‌گیری مستقیم بعضی از خواص سنگ مانند چگرمگی و شکنندگی توسعه داده شد (Handewit. Hj, 1970; Dollinger et al., 1998). هنوز محققان به تفاهم مشترکی در نحوه انجام این آزمایش و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش دست نیافته‌اند. این آزمایش با استفاده از یک مخروط که با اعمال نیرو در داخل سنگ نفوذ می‌کند انجام می‌شود (شکل ۳-۱ الف). میزان نفوذ و نیروی اعمالی در حین انجام آزمایش ثبت شده و به صورت نموداری (شکل ۳-۱ ب) ارائه می‌گردد که در آن محور افقی نشان دهنده میزان نفوذ و محور قائم نشان دهنده بار وارده می‌باشد. با توجه به اینکه روش‌های تفسیر متفاوتی بر روی این منحنی (شیب متوسط یا بیشترین شیب یا سطح زیر نمودار) وجود دارد می‌توان شاخص‌های مختلفی را از آن استخراج نمود. (Dollinger et al., 1998). استخراج شاخص‌های مختلف سنگ تنها با انجام یک آزمایش، این آزمایش را نسبت به آزمایش‌های دیگر برتری داده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳-۱. (الف) ترسیم شماتیکی از دستگاه و نمونه مورد آزمایش در آزمایش نفوذ (Jeong et al., 2015) و (ب) تفسیرهای مختلف از نمودار نیرو نفوذ حاصل از آزمایش (Yagiz, 2009)

در آزمایش نفوذ مشخصات مخروط استفاده نیز مهم است. برای نمونه یاگیز و رستمی (۲۰۱۲) از نفوذ کننده با زاویه راس ۱۲۰ درجه و شعاع نوک ۳/۱۷۵ میلی‌متر استفاده کردند (Yagiz and Rostami, 2012). دستگاه مورد استفاده بایستی مجهز به سیستم اکتساب داده باشد تا اطلاعات به صورت پیوسته ثبت گردد. نمونه سنگ مورد استفاده دارای قطر ۵۴ میلی‌متر (NX) و نسبت ارتفاع به قطر ۱:۱ باشد. بالا و پایین نمونه صاف و تخت، و تا حد امکان عاری از زبری باشد. برای انجام آزمایش نمونه با گچ در داخل استوانه فولادی با قطر ۱۱۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد (Yagiz and Rostami, 2012).

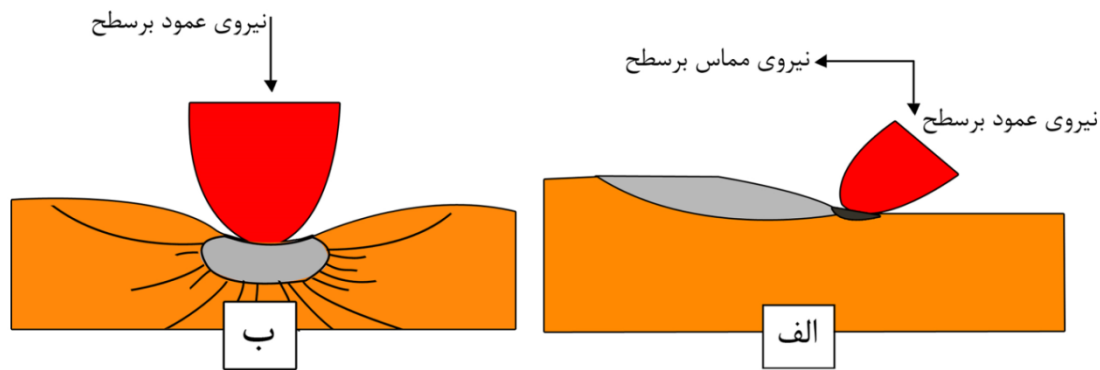
2012). در زمان انجام آزمایش جابجایی نفوذکننده به داخل نمونه و نیروی اعمالی کنترل می‌گردد. آزمایش تحت نرخ جابجایی ثابت یک هزارم اینچ بر ثانیه انجام می‌شود و تا زمانی ادامه می‌یابد که نفوذکننده به حد نفوذ خود برسد که معمولاً این حد برابر ۶ میلی‌متر است (Jeong et al., 2015; Yagiz and Rostami, 2012). قهرمان و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعاتشان برای انجام این آزمایش از نفوذکننده‌ای با زاویه راس ۶۰ درجه و شعاع کروی ۵ میلی‌متر استفاده کردند. نمونه سنگ‌های مورد آزمایش دارای قطر NX و نسبت ارتفاع به قطر ۰/۷۵ بوده است. آن‌ها این نمونه‌ها را تا حدود ۲۰ کیلو نیوتن زیر بار قرار دادند (Kahraman et al., 2012).

بررسی تعامل ابزار-سنگ می‌تواند ابعاد جدیدی از کارآمدی شاخص‌های بدست آمده از آزمایش نفوذ نفوذگر را در توسعه شاخص قابلیت حفاری در سنگ مخازن نفت و گاز روشن سازد؛ بنابراین، در ادامه به بررسی مکانیزم خردایش سنگ در حوزه نفت و گاز پرداخته خواهد شد.

۱-۵. مکانیزم خردایش سنگ

از زمانی که اولین مته در صنعت نفت مورد استفاده قرار گرفت، تحقیقات بسیاری بر روی عملکرد مته با تمرکز روی تعامل ابزار - سنگ انجام گرفته است. این تحقیقات همچنان ادامه دارد زیرا تحقق درک کاملی از تعامل ابزار-سنگ از پیچیدگی‌های زیادی برخوردار است (Wu et al., 2010).

با توجه به اینکه در حفاری دورانی چاه‌های نفت و گاز، دوران مته و وزن روی آن موجب نفوذ و پیشروی مته در سنگ می‌شود؛ لذا، دو نوع مکانیزم خردایش سنگ یعنی مکانیزم خراش و نفوذ در سنگ در این روش حفاری وجود دارد. در مکانیزم خراش نیروی مماس بر سطح، اثری غالب‌تر در خردایش سنگ دارد (شکل ۱-۴ الف)) در حالی که نیروی عمودی در مکانیزم نفوذ، موجب خرد شدن سنگ می‌شود (شکل ۱-۴ ب)). سرعت دوران بالا و وزن روی مته پایین در سنگ‌های نرم موجب افزایش نرخ نفوذ خواهد شد؛ در حالی که، در سنگ‌های سخت افزایش وزن روی مته و کاهش سرعت دوران موجب حصول نرخ حفاری بالا خواهد شد. در نتیجه می‌توان گفت که فرآیند غالب در شکست سنگ‌های نرم، خراش و در سنگ‌های متوسط و سخت، نفوذ است. بسیاری از مشکلات حفاری، از جمله نرخ نفوذ پایین مته، در سنگ‌های سخت رخ می‌دهد (Santos et al., 2000)؛ که منجر به افزایش هزینه‌های حفاری می‌شود؛ بنابراین، نیاز است اثر متقابل مته-سنگ در سازندهای متوسط و سخت بیشتر مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱-۴. دو نوع مکانیزم عملکرد ابزار در سنگ: (الف) مکانیزم خراش و (ب) مکانیزم نفوذ (Ramezanzadeh and Hood, 2010)

فرآیند نفوذ ابزار در سنگ را می‌توان به چهار مرحله ایجاد ناحیه خرد شده، ایجاد ترک، گسترش ترک و ایجاد تراشه تقسیم نمود (Matti, 1999). زمانی که نوک ابزار شروع به نفوذ در سطح سنگ می‌کند تنش با افزایش بار روی ابزار، افزایش می‌یابد و سنگ شروع به تغییر شکل می‌کند. در این زمان در ناحیه زیر نوک ابزار ناحیه خرد شده ایجاد می‌شود. این ناحیه خرد شده شامل چندین ریزترک می‌باشد. با افزایش بار روی ابزار، ترک‌هایی اصلی در سنگ ایجاد می‌شود. مکان این ترک‌های اصلی وابسته به شکل نفوذکننده است (Zou, 2017). با افزایش نیرو، تمرکز انرژی در نوک ترک افزایش می‌یابد. با غالب شدن مقدار انرژی تمرکز یافته، ترک به صورت ناگهانی و به سرعت رشد می‌کند. زمانی که نیرو به یک مقدار کافی برسد، یک یا چند تراشه با گسترش ترک‌های زیر نوک نفوذکننده تا سطح سنگ ایجاد می‌شود. با ایجاد تراشه، نیرو نیز کاهش می‌یابد. برای نفوذ بیشتر در سنگ، نیرو دوباره تا یک سطح بالاتر افزایش می‌یابد. این فرآیند خردایش در آزمایش نفوذ نفوذگر به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.

۱-۶. ضرورت تحقیق

آمارها نشان می‌دهد که زمان حفاری حدود یک سوم از زمان لازم برای حفر چاه است و این مقدار در چاه‌های عمیق حدود یک دوم می‌باشد (Li et al., 2015). هزینه‌های حفاری بسیار وابسته به زمان انجام فرآیند حفاری می‌باشد. در نتیجه، کاهش زمان حفاری (یعنی افزایش نرخ نفوذ) می‌تواند هزینه‌های حفاری را به طور چشمگیری کاهش دهد. بر این اساس تلاش‌های بسیاری برای افزایش نرخ نفوذ و کاهش هزینه‌های حفاری صورت گرفته است. برای مثال در سال ۲۰۰۶ بهینه‌سازی فرآیند حفاری در یکی از پروژه‌های حفاری در کشور مکزیک منجر به طراحی مته مناسب و افزایش نرخ نفوذ شد که

در نتیجه آن زمان حفاری ۳۰ روز نسبت به زمان برنامه‌ریزی شده تقلیل پیدا کرد که در نتیجه آن هزینه‌های حفاری به ارزش ۱/۵ میلیون دلار آمریکا کاهش یافت (Quiroga et al., 2006).

افزایش نرخ نفوذ نیازمند داشتن مدل جامع تخمین‌گر نرخ نفوذ است. با توجه به تأثیر قابل توجه مشخصات سازند در نرخ حفاری و انتخاب مته مناسب، بسیاری از مدل‌های نرخ نفوذ ارائه شده تا کنون اثر مشخصات سازند را به درستی لحاظ نکرده‌اند. حتی در مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ، به عنوان یک مدل پرکاربرد، تنها یک پارامتر از سازند به عنوان قابلیت حفاری لحاظ شده است. با وجود چشم‌پوشی از این محدودیت مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ، این مدل مقدار قابلیت حفاری سنگ را در طول عمق سازند ثابت فرض می‌کند.

با توجه به محدودیت‌های موجود در مدل‌های نرخ نفوذ ارائه شده قبلی، بهبود این مدل‌ها با شاخص قابلیت حفاری می‌تواند دقت و قابلیت اطمینان این مدل‌ها را بهبود دهد. علاوه‌براین، وجود این شاخص می‌تواند ابزاری بسیار کارا در انتخاب مته مناسب و یا طراحی و ساخت آن باشد. از اینرو، در پژوهش حاضر به ارزیابی تأثیر پارامترهای سازندی در سرعت حفاری و تعیین قابلیت حفاری سنگ پرداخته خواهد شد.

۷-۱. فرضیات پژوهش حاضر

پژوهش حاضر دارای برخی محدودیت‌ها، به صورت زیر می‌باشد:

- با توجه به اینکه نگارهای پتروفیزیکی تنها برای سنگ مخزن تهیه می‌شود لذا داده‌های قابل بررسی در این تحقیق تنها به محدوده سنگ مخزن مرتبط می‌باشد.
- داده‌های ژئومکانیکی به طور غیرمستقیم از نگارهای پتروفیزیکی بدست خواهند آمد که در صورت وجود مغزه، آزمایش‌های کالیبراسیون انجام خواهد شد.
- به دلیل این که میزان دقیق وزن روی مته در چاه‌های شیب‌دار، به دلیل وجود اصطکاک بین لوله‌های حفاری و دیواره چاه، مشخص نیست. بررسی‌ها محدود به چاه‌های قائم خواهد بود.

۸-۱. اهداف تحقیق

اهداف پژوهش حاضر را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- تعیین پارامترهای موثر ژئومکانیکی بر روی نرخ نفوذ و میزان تأثیر آن‌ها
- بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی نرخ نفوذ
- ارائه شاخص قابلیت حفاری

➤ بررسی نحوه تعیین شاخص جدید از روی نگارهای پتروفیزیکی

۹-۱. روش انجام تحقیق

به منظور تعیین قابلیت حفاری سنگ مخازن نفت و گاز در این تحقیق نیاز است نگارهای پتروفیزیکی و پارامترهای عملیاتی چاه‌های مورد مطالعه گردآوری شود. در ادامه برای تحلیل جامع اثر ویژگی‌های سنگ روی نرخ نفوذ، مدل‌سازی یک بعدی چاه برای تخمین دقیق ویژگی‌های ژئومکانیکی انجام خواهد شد. سطح اول پایگاه داده مشتمل بر سه پایگاه داده می‌باشد؛ که در پایگاه اول تنها پارامترهای عملیاتی، در پایگاه دوم علاوه بر پارامترهای عملیاتی، نگارهای پتروفیزیکی و در پایگاه سوم پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ قرار دارند. به دلیل استفاده از داده‌های میدانی در این مطالعه که اصولاً همراه با نوفه^۱ می‌باشند؛ پیش‌پردازش داده شامل کاهش اثر نوفه و انتخاب ویژگی‌های برتر به منظور افزایش کیفیت داده‌ها و افزایش دقت مدل‌های تخمین‌گر نرخ نفوذ حفاری بر روی پایگاه-های داده اعمال خواهد شد. با استفاده از اطلاعات سه پایگاه داده سطح اول، مدل‌سازی نرخ حفاری به منظور شناسایی و درک ارزش مشخصات سنگ در بهبود دقت مدل‌های نرخ نفوذ انجام خواهد شد. در ادامه با انجام آزمایش نفوذ نفوذگر و تحلیل نمودار نیرو-نفوذ این آزمایش به تعیین شاخص‌های مختلف سنگ پرداخته خواهد شد؛ که در مکانیزم خردایش سنگ موثر می‌باشند. سپس ارتباط هر یک از این شاخص‌ها با نرخ نفوذ مشاهده شده در چاه ارزیابی خواهد شد. شاخصی که بهترین ارتباط را با نرخ نفوذ دارد به عنوان شاخص قابلیت حفاری سنگ انتخاب خواهد شد. در ادامه، رابطه نگارهای پتروفیزیکی و ویژگی‌های سنگ با شاخص قابلیت حفاری ارزیابی و مدلی برای تخمین آن ارائه خواهد شد. از مدل تخمین‌گر بدست آمده برای تخمین قابلیت حفاری سنگ در چاه‌های مورد مطالعه استفاده خواهد شد. سپس سطح دوم پایگاه داده که در برگرفته شاخص قابلیت حفاری و پارامترهای عملیاتی است برای هر چاه تشکیل خواهد شد. در انتها برای اعتبارسنجی شاخص جدید، مدل نرخ نفوذی مبتنی بر آن ایجاد و با مدل‌های پیشنهادی سطح اول پایگاه داده و همچنین مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ مقایسه خواهد شد.

۱۰-۱. ساختار رساله

پژوهش حاضر مشتمل بر هشت فصل می‌باشد. در فصل اول به پارامترهای تأثیرگذار در نرخ نفوذ، اهداف و ضرورت انجام پژوهش و همچنین روش انجام پژوهش اشاره شد. در فصل دوم به کارهای انجام شده توسط محققین دیگر در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی نرخ نفوذ و تعیین قابلیت حفاری

¹ Noise

سنگ پرداخته خواهد شد. مراحل دریافت اطلاعات از شرکت مناطق نفتخیز جنوب و چاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش در فصل سوم اشاره خواهد شد. در فصل چهارم به تخمین ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ از نگارهای پتروفیزیکی، تنش‌های برجا و پنجره ایمن وزن گل با استفاده از معیارهای شکست موهر-کلمب و هوک-براون پرداخته خواهد شد. در فصل پنجم پیش‌پردازش روی داده‌ها به منظور تجمیع منابع اطلاعاتی مختلف و تشکیل پایگاه‌های داده مختلف انجام خواهد شد. همچنین؛ در این فصل برای افزایش کیفیت داده‌های مورد استفاده، به بررسی وجود نوفه در داده‌ها و کاهش اثر آن‌ها پرداخته خواهد شد. در ادامه برای انتخاب بهترین پارامترهای تأثیرگذار در مدل‌سازی نرخ نفوذ، انتخاب ویژگی روی پایگاه‌های داده اعمال خواهد شد. در فصل ششم با استفاده از پارامترهای انتخاب شده هر پایگاه داده سطح اول به مدل‌سازی نرخ نفوذ با روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه پرداخته خواهد شد. در فصل هفتم به منظور توسعه قابلیت حفاری سنگ مخازن نفت و گاز از آزمایش نفوذ نفوذگر استفاده خواهد شد و شاخص‌های مهم در مکانیزم خردایش سنگ از نمودار نیرو-نفوذ حاصل از آن استخراج خواهد شد. در ادامه کارایی شاخص قابلیت حفاری ارائه شده در مدل‌های نرخ نفوذ اعتبارسنجی خواهد شد. پیشنهادات و نتیجه‌گیری نیز در فصل هشتم رساله ارائه خواهد شد.

فصل دوم: مرور پیشینه موضوع

۲-۱. مقدمه

بررسی اثر هر یک از پارامترهای تأثیرگذار روی نرخ نفوذ به صورت مستقل از سایر پارامترها، به دلیل تأثیر توأمان آن‌ها روی نرخ نفوذ منجر به ارائه نتایج غیرواقعی خواهد شد؛ بنابراین، برای درک اهمیت هر کدام از پارامترها روی نرخ نفوذ، نیاز است مدل نرخ نفوذی متناسب با شرایط میدان مورد مطالعه اتخاذ شود. سپس، تحلیل حساسیت روی پارامترهای مورد بررسی به منظور شناسایی و درک نقش آن در تخمین نرخ نفوذ انجام شود؛ بنابراین، نیاز است برای مشخص کردن سهم مشخصات سازند در مقدار نرخ نفوذ، اثر خواص سازند را در کنار پارامترهای عملیاتی تحلیل نمود. در نتیجه، نیاز به انتخاب مدل نرخ نفوذی است؛ که در برگیرنده ویژگی‌های سنگ و متناسب با شرایط چاه‌های مورد مطالعه باشد. در صورت عدم وجود مدل نرخ نفوذی، بهتر است مدل‌سازی نرخ حفاری با استفاده از داده‌های چاه مورد مطالعه انجام شود. بدین منظور، در این فصل ابتدا به تلاش‌های انجام شده برای مدل‌سازی رگرسیونی نرخ نفوذ پرداخته خواهد شد. سپس، کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در این زمینه بررسی خواهد شد و در ادامه به کارهای انجام شده در مورد تعیین قابلیت حفاری سنگ پرداخته خواهد شد.

۲-۲. مروری بر روابط نرخ نفوذ ارائه شده

تلاش‌های بسیاری برای مدل‌سازی نرخ نفوذ انجام شده است. روش‌های به کار رفته در این زمینه را می‌توان به دو گروه، روش‌های رگرسیونی و هوش مصنوعی تقسیم نمود. استفاده از روش‌های رگرسیونی در چند دهه پیش بسیار متداول تر بوده است. اما امروزه به دلیل نتایج بسیار خوب روش‌های هوش مصنوعی در حل مسائل پیچیده صنعت، بیشتر از این روش‌ها برای تخمین نرخ نفوذ در چاه‌های نفت و گاز بهره برده شده است. در ادامه کارهای انجام شده در هر یک از این روش‌ها به اختصار شرح داده خواهد شد.

۲-۲-۱. مدل‌های رگرسیونی نرخ نفوذ

مدل‌های رگرسیونی متعددی برای تخمین نرخ نفوذ از پارامترهای عملیاتی ارائه شده است. برخی از این مدل‌ها با توجه به شرایط عملیاتی میدانی مورد مطالعه ارائه شده‌اند و دارای پارامترهای محدودی برای تخمین نرخ حفاری می‌باشند؛ از اینرو، کمتر از این مدل‌ها در سایر میدانی دیگر استفاده شده است. در ادامه به تعدادی از تحقیقات مهم صورت گرفته در این زمینه پرداخته خواهد شد.

لینگن و گارنیر (۱۹۵۹) با استفاده از مته‌های غلتکی به ارزیابی اثر وزن گل حفاری، فشار منفذی و مقاومت فشاری تک محوره و نفوذپذیری سنگ بر روی نرخ نفوذ پرداختند. آن‌ها دریافتند که به دلیل افزایش مقاومت سنگ با افزایش اختلاف فشار ته چاه، می‌توان نرخ نفوذ را با تغییر فشار سیال حفاری کنترل نمود. همچنین آن‌ها نشان دادند که نرخ نفوذ با افزایش عمق به دلیل افزایش مقاومت سنگ، کاهش می‌یابد. رابطه نرخ نفوذ ارائه شده با استفاده از مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، قطر مته (d) و وزن روی مته (WOB) به شکل زیر می‌باشد (Garnier and Van Lingen, 1959):

$$ROP = a \frac{WOB}{UCS \times d} - bd \quad 1-2$$

در این رابطه a و b ضرایب ثابتی هستند که با توجه به نوع مته و شکل آن، برای چاه‌های مورد مطالعه تعیین می‌شوند.

مائورر (۱۹۶۲) رابطه نرخ نفوذی را برای مته‌های غلتکی براساس مکانیزم شکست سنگ در زون‌های خرد شده معرفی کرد. رابطه ارائه شده را در صورتی می‌توان استفاده نمود که شرایط تمیزی کامل ته چاه برقرار باشد. این رابطه براساس وزن روی مته (WOB)، قطر مته (d) و سرعت دوران (N)، قابلیت حفاری (C_F) و مقاومت در برابر حفاری (s) به شکل زیر توسعه داده شده است (Maurer, 1962):

$$ROP = C_F \frac{N \times WOB^2}{d^2 \times s^2} \quad 2-2$$

برای اولین بار گاله و وودز (۱۹۶۳) تأثیر کنترل پارامترهای حفاری به منظور بهبود نرخ نفوذ و در نتیجه کاهش هزینه‌های حفاری را با استفاده از یک رابطه ریاضی بررسی کردند. برای این منظور آن‌ها تنها روی دو پارامتر وزن روی مته و سرعت دوران تمرکز کردند. بر این اساس گراف‌ها و دستورالعمل‌هایی را برای کاربردهای عملی در تعیین بهترین مقادیر وزن روی مته و سرعت دوران توسعه دادند. همچنین مطالعات آن‌ها روی سیال حفاری و مته نشان داد که انتخاب مته مناسب و هیدرولیک آن تأثیر چشمگیری روی نرخ نفوذ دارد. علاوه بر این آن‌ها نشان دادند که ارتباط مستقیمی بین سائیدگی مته و وزن روی آن وجود دارد. رابطه ارائه شده (رابطه ۲-۳) در برگیرنده سرعت دوران (N)، وزن روی مته (WOB)، استحکام سازند (K) و قابلیت حفاری (C_F) می‌باشد (Galle and Woods, 1963).

$$ROP = C_F \frac{WOB^K \times N}{a^b} \quad 3-2$$

ضرایب a و b در این رابطه همانند رابطه ۲-۱ با توجه به نوع و شکل مته تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که قابلیت حفاری در این رابطه بدون توجه به مشخصات سازند تعیین می‌گردد.

بینگهام (۱۹۶۵) براساس داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ای را برای تخمین نرخ نفوذ ارائه داد. او در این رابطه آستانه وزن روی مته را ناچیز در نظر گرفت و سرعت نفوذ را تابعی از وزن روی مته (WOB)، استحکام سازند (K)، قطر مته (d) و سرعت دوران (N) دانست. در این رابطه (رابطه ۲-۴) توان وزن روی مته (a_5) براساس شرایط میدان مورد مطالعه و به صورت تجربی بدست می‌آید (Bingham, 1965).

$$ROP = K \left(\frac{WOB}{d} \right)^{a_5} N \quad ۴-۲$$

یکی از مهم‌ترین تحقیقات در مورد تعیین مقادیر بهینه پارامترهای حفاری به وسیله بورگوین و یانگ در سال ۱۹۷۴ صورت گرفت. که مدلی (رابطه ۲-۵) از نرخ نفوذ مد نظر قرار گرفت و با استفاده از برآزش چندگانه^۱ داده‌های حفاری، وزن روی مته، سرعت دوران و هیدرولیک؛ مته مناسب اتخاذ شد. بدین منظور تأثیر مقاومت سازند، عمق سازند، تراکم سازند، فشار تفاضلی، قطر مته، وزن روی مته، سرعت دوران، سائیدگی مته و هیدرولیک مته بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که مراحل تحلیل رگرسیونی می‌تواند برای ارزیابی نظام‌مند بسیاری از ثابت‌ها در رابطه نرخ نفوذ استفاده شود. لازم به ذکر است که برای بررسی ثابت رگرسیونی، منابع اطلاعاتی چندین چاه بایستی فراهم شود لذا داده‌های حداقل ۲۵ چاه برای تعیین ثابت‌های a_1, a_2, \dots, a_8 گردآوری شد. نتایج مطالعات نشان داد که استفاده از روابط بهینه‌سازی حفاری نسبتاً ساده می‌تواند هزینه‌های حفاری را تا حدود ۱۰ درصد کاهش دهد. روابط ارائه شده در این تحقیق به دلیل نگرش وسیع از مقبولیت بیشتری در صنعت نفت برخوردار است (Bourgoyne and Young, 1974). از محدودیت‌های مدل ارائه شده می‌توان به حساس بودن نتایج نسبت به ضرایب ثابت مدل دانست. علاوه‌براین، برای بدست آوردن این ضرایب بایستی برای هر سازند حداقل ۸ نقطه داده وجود داشته باشد. همچنین، این مدل، با نادیده گرفتن وجود تغییرات خواص سنگ در طول عمق سازند، یک مقدار قابلیت حفاری را برای هر سازند تخصیص می‌دهد.

$$ROP = f_1 \times f_2 \times f_3 \times f_4 \times f_5 \times f_6 \times f_7 \times f_8 \quad ۵-۲$$

که در آن:

¹ Multiple regression analysis

$$\begin{aligned}
 f_1 &= e^{2.303a_1} & 6-2 \\
 f_2 &= e^{2.303a_2(10000-D)} & 7-2 \\
 f_3 &= e^{2.303a_3D^{0.69}(g_p-\rho_c)} & 8-2 \\
 f_4 &= e^{2.303a_4D(g_p-\rho_c)} & 9-2 \\
 f_5 &= \left[\frac{\left(\frac{W}{d_b}\right) - \left(\frac{W}{d_b}\right)_t}{4 - \left(\frac{W}{d_b}\right)_t} \right]^{a_5} & 10-2 \\
 f_6 &= \left(\frac{N}{60}\right)^{a_5} & 11-2 \\
 f_7 &= e^{-a_7h} & 12-2 \\
 f_8 &= \left(\frac{F_j}{1000}\right)^{a_8} & 13-2
 \end{aligned}$$

در این روابط، D عمق (ft)، g_p گرادیان فشار منفذی (lbm/gal)، ρ_c چگالی گل در جریان (lbm/gal)، $\left(\frac{W}{d_b}\right)_t$ وزن روی مته آستانه حفر به ازای هر اینچ از قطر مته، W وزن روی مته، N سرعت دوران (rev/min)، h درصد سائیدگی دندانگی و F_j نیروی ضربه نازل مته (lbf) می‌باشد.

واکر و همکاران (۱۹۸۶) تلاش‌هایی را برای یافتن روابطی بین نرخ نفوذ و خواص مکانیکی سنگ با استفاده از نگارهای مقاومت ویژه و خواص الاستیک سنگ انجام دادند. برای این منظور آن‌ها آزمایش حفاری کوچک^۱ را روی چندین نمونه سنگی پیاده کردند. رابطه آن‌ها برای تخمین نرخ نفوذ در مته-های کاجی، در برگیرنده وزن روی مته (WOB)، مقاومت فشاری برجا (σ_{in})، تخلخل (ϕ)، فشار سیال حفاری در ته چاه (P_w) و متوسط اندازه دانه‌های سنگ (g) می‌باشد. آن‌ها مقاومت فشاری برجا را با استفاده از پوش موهر-کلمب و نتایج آزمایشگاهی مقاومت فشاری محاسبه نمودند. یکی از اهداف اصلی این مدل (رابطه ۱۴-۲) نشان دادن اثر ویژگی‌های سنگ بر نرخ حفاری می‌باشد (Walker et al., 1986). نتایج این مطالعه به خوبی افزایش دقت مدل تخمین گر نرخ حفاری را در نتیجه استفاده از خواص سنگ را نشان داد. هرچند مدل ارائه شده تنها در برگیرنده مقاومت فشاری برجا می‌باشد.

$$ROP = 14 + 54WOB - 56P_w + 31\phi - 10g - 16\sigma_{in} + 46P_w^2 - 31P_wWOB \quad 14-2$$

واکر و همکاران (۱۹۸۶) پیشنهاد دادند که در صورت عدم دسترسی به پوش موهر-کلمب می‌توان بیشینه نیروی لازم برای نفوذ (f) در سنگ را جایگزین مقاومت فشاری برجا نمود. براین اساس آن‌ها رابطه زیر را ارائه نمودند.

¹ Micro-bit drilling

$$ROP = 25 + 53WOB - 63P_w + 25\phi - 15g - 20f + 48P_w^2 - 29P_wWOB \quad 15-2$$

وارن (۱۹۸۷) مدلی را برای تخمین نرخ نفوذ با استفاده از مته‌های غلتکی و در شرایط فشار فروتعادلی^۱ توسعه داد. بعدها این مدل توسط هارلند و هوبراک (۱۹۹۳) برای در نظر گرفتن فشار فراتعادلی^۲ بهبود یافت. تاکنون این مدل، بهترین مدل در میان تمامی مدل‌های ارائه شده برای مته-های غلتکی سه کاجه می‌باشد. رابطه ۲-۱۶ اصلاح شده رابطه وارن می‌باشد که در آن از چگالی سیال حفاری (ρ_m) و گرانیوی پلاستیک آن (μ)، قطر مته (d)، سرعت دوران (N)، مقاومت سازند در برابر حفاری (S)، نیروی لازم برای نفوذ (f_c)، فشار محدود کننده (P_e)، نیروی ضربه نازل اصلاح شده (I_m)، نسبت سائیدگی مته (w_f)، ویژگی‌های مته (a, b, c) و ثابت‌های مقاومتی سنگ (a_s, b_s) استفاده شده است (Bataee and Mohseni, 2011; Hareland and Hoberock, 1993; Rahimzadeh et al., 2011).

$$ROP = w_f [f_c(P_e) \left(\frac{aS^2d^3}{N WOB^2} + \frac{b}{Nd} \right) + \frac{c\rho_m\mu d}{I_m}] \quad 16-2$$

$$w_f = 1 - \frac{\Delta BG}{8} \quad 17-2$$

$$S = UCS(1 + a_s P_e^{b_s}) \quad 18-2$$

مایدلا و اوهارا (۱۹۹۱) یک مدل جدید (رابطه ۲-۱۹) را با استفاده از داده‌های حفاری دریایی^۳ توسعه دادند و نتایج آن را با مدل بورگوین و یانگ (Bourgoyne and Young, 1974) مقایسه کردند. تفاوت مدل مایدلا و اوهارا با مدل بورگوین و یانگ در به کارگیری مقاومت فشاری تک محوره است. هدف از این مطالعه انتخاب مته، یاتاقان مته، وزن روی مته و سرعت دوران بهینه رشته حفاری با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های حفاری بود. برای این مطالعه داده‌های پنج چاه از میدان آلاگاس جمع آوری شد؛ که از داده‌های چهار چاه برای حصول ضرایب ثابت هر دو مدل و از چاه دیگر برای آزمون مدل استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که نرخ نفوذ پیش‌بینی شده به وسیله هر دو مدل با هم همخوانی دارد. همچنین عملکردهای مدل پیش‌بینی نرخ حفاری وابسته به کیفیت داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی است (Maidla and Ohara, 1991). یکی از محدودیت‌های مدل مایدلا و اوهارا در نظر گرفتن یک مقدار قابلیت حفاری برای طول سازند براساس رابطه نمایی بین نرخ حفاری و مقاومت فشاری تک محوره است.

¹ Under-balanced

² Over-Balanced

³ Off-shore drilling

$$R_D = \exp(b_1 + y_1 + \sum_{k=2}^6 b_k y_k) \quad 19-2$$

که در آن:

$$y_1 = \ln(vd) \quad 20-2$$

$$y_2 = \ln\left(\frac{W}{S_c d^2}\right) \quad 21-2$$

$$y_3 = (P_p - P_c)/S_c \quad 22-2$$

$$y_4 = 2 - 5 \times 10^{-5} \left(\frac{D}{d}\right) \quad 23-2$$

$$y_5 = \ln\left(\frac{F_j}{S_c d^2}\right) \quad 24-2$$

$$y_6 = -\frac{h}{d} \quad 25-2$$

در این روابط، d قطر مته، D عمق، W وزن روی مته، h ضریب سائیدگی دندانه مته، P_c فشار حاصل از سیال در ته چاه، P_p فشار منفذی، S_c مقاومت فشاری و v سرعت دوران می باشد.

بورنسون و همکاران (۲۰۰۴) برای بهینه سازی عملیات حفاری چاهی قائم در غرب کانادا سیستم نرم-افزاری خبره انتخاب مته حفاری و الگوریتم پیش بینی نرخ نفوذ را به کار بردند. داده های گردآوری شده قبل از استفاده به لحاظ کیفیت و دقت ثبت مورد بررسی قرار گرفتند. این سیستم پارامترهای زمان سیر موج فشاری، نگار گاما، سرعت دوران مته مورد نظر، وزن روی مته، فشار سیال حفاری، فشار منفذی و طول پیمایش مته را از کاربر دریافت و پارامترهای مقاومت فشاری تک محوره، سختی، ساینده گی و نرخ نفوذ پیش بینی شده را محاسبه می نماید. نرخ نفوذ در این مطالعه با استفاده از رابطه ۲-۲۶ و براساس انرژی مخصوص مکانیکی محاسبه شد. اعمال این روش موجب افزایش نرخ نفوذ و عمر مته ¹TCI شد و زمان کلی حفاری، ۱۵ روز نسبت به زمان برنامه ریزی شده کاهش یافت و هزینه میانگین به ازای هر روز برابر ۵۰،۰۰۰ دلار گردید که این امر موجب ۷۵۰،۰۰۰ دلار صرفه جویی در هزینه کل عملیات حفاری شد (Bjornsson et al., 2004). با توجه به اینکه سیستم نرم افزاری فقط سه پارامتر نگار گاما، زمان سیر موج فشاری و فشار منفذی مربوط به سازند را دریافت می نماید مشخص نیست که چگونه قادر به ارائه سختی و ساینده گی براساس این سه پارامتر ورودی برای سازند است.

¹ Tungsten Carbide Insert

$$ROP = 2538 \times \frac{HP}{MSE_{Min} \times d} \quad 26-2$$

در این رابطه HP توان منتقل شده از مته به سنگ، d قطر مته و MSE_{Min} حداقل انرژی مخصوص مکانیکی می‌باشد.

هانکینز و همکاران (۲۰۱۵) با شبیه‌سازی فرآیند حفاری یکی از چاه‌های حفاری شده، به بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی به منظور حفاری چاه‌های مجاور پرداختند. بدین منظور آن‌ها ابتدا از مدل نرخ نفوذ ارائه شده توسط هارلند و رامپرساد (۱۹۹۴) به تخمین قابلیت حفاری سازند پرداختند (رابطه ۲۷-۲). سپس با استفاده از قابلیت حفاری سازند، مقادیر پارامترهای وزن روی مته و سرعت دوران را به گونه‌ای بهینه‌سازی نمودند که منجر به دستیابی به بیشینه نرخ حفاری با کمترین هزینه ممکن شود (Hankins et al., 2015). یکی از محدودیت‌های این تحقیق عدم توجه به پارامتر قابلیت حفاری سازند در مدل هارلند و رامپرساد است که تنها بر مبنای مقاومت تک محوری سنگ و بدون در نظر گرفتن شرایط داخل چاه لحاظ شده است. افزایش نرخ حفاری به معنی تولید خرده‌های حفاری بیشتر در ته چاه است که برای تداوم و حفظ نرخ نفوذ بیشینه، عمل پاکسازی ته چاه بایستی به درستی انجام شود؛ بنابراین، نیاز است که نرخ جریان سیال حفاری تغییر یابد که این خود بر شرایط فشار جانبی در ته چاه تأثیرگذار است.

$$ROP = \frac{14.14 \times WOB \times RPM \times \cos \alpha}{S \times d_b \times \tan \theta} \times \frac{a}{RPM^b \times WOB^c} \quad 27-2$$

در این رابطه، d_b قطر مته، S قابلیت حفاری سازند، α زاویه سمت چنگک جمع‌کننده^۱، θ زاویه پشت چنگک جمع‌کننده^۲ و ضرایب a ، b و c فاکتورهای تصحیح هندسه برنده می‌باشند.

کشاورز مروجی و نادری (۲۰۱۶) از روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی نرخ نفوذ با استفاده از شش پارامتر، وزن روی مته، سرعت دوران مته، نیروی ضربه نازل مته (IF)، نسبت نقطه تسلیم به گرانشی پلاستیک سیال حفاری (Y_p)، عمق حفاری (D) و نسبت مقاومت ژل ده دقیقه به ده ثانیه (M_s) سیال حفاری استفاده کردند. مدل رگرسیونی حاصل در تخمین دقیق نرخ نفوذ و بهینه‌سازی پارامترهای حفاری بسیار کارآمد عمل کرد (Keshavarz Moraveji and Naderi, 2016). رابطه ۲۸-۲ مدل رگرسیونی بدست آمده را نشان می‌دهد که یک رابطه نمایی است و در برگیرنده اثر متقابل دو به دوی

¹ Side-rake angle

² Back-rake angle

پارامترهای ورودی بر روی یکدیگر نیز می‌باشد. یکی از محدودیت‌های این مدل عدم بررسی هم‌خطی داده‌ها در شرایطی است که توان درجه دوم متغیرهای مورد بررسی در مدل وارد می‌شوند.

$$\begin{aligned}
 \ln(ROP) = & 2.13 - 1.03WOB + 5.94I_F + 1.64M_S - 3.50D^2 \\
 & - 1.67WOB^2 - 1.56N^2 - 3.21I_F^2 + 0.956M_S^2 + 4.15D \\
 & \times WOB + 2.42D \times N - 3.92D \times I_F + 2.19D \times Y_P \\
 & - 2.1pD \times M_S + 0.449WOB \times N - 1.51WOB \times I_F \\
 & + 0.413WOB \times Y_P + 1.57N \times I_F - 1.30N \times M_S - 3.76I_F \\
 & \times Y_P + 1.28I_F \times M_S - 1.65Y_P \times M_S
 \end{aligned}
 \tag{2-28}$$

بیشتر تحقیقات انجام شده دیگر در این زمینه مربوط به تعیین ضرایب ثابت مدل بورگوین و یانگ بوده است. با توجه به این که بورگوین و یانگ (۱۹۷۴) روش رگرسیون چند متغیره را برای تعیین این ضرایب پیشنهاد داده بودند؛ به کارگیری این مدل توسط محققین دیگر نشان داد که استفاده از روش رگرسیونی منجر به نتایج غیر منطقی می‌شود (Anemangely et al., 2017a; Bahari and Baradaran Seyed, 2007; Bahari et al., 2008; Formighieri and Filho, 2016; Nascimento et al., 2015; Rahimzadeh et al., 2011). به این علت محققین پیشنهاد دادند؛ که از روش‌های ریاضی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی برای تعیین مقادیر بهینه این ضرایب ثابت با توجه به داده‌های میدان مورد مطالعه استفاده شود. مقایسه این روش‌ها نشان داد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی نتایج بهتری را نسبت به روش‌های آماری و ریاضی ارائه می‌دهند. در این میان، مقادیر ضرایب ثابت محاسبه شده با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته نشان داد که منجر به تخمین دقیق‌تر نرخ نفوذ می‌شود (Anemangely et al., 2017b).

۲-۲-۲. مدل‌های هوش مصنوعی نرخ نفوذ

مرادی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از محاسبات نرم مدل جدیدی را برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه دادند. پارامترهای ورودی این مدل شامل، عمق واقعی عمودی، وزن روی مته، قطر مته، سرعت دوران، گرادیان فشار منفذی، چگالی معادل در جریان، درصد سائیدگی دندان مته و نیروی ضربه نازل می‌باشند. مرادی و همکاران (۲۰۱۰) از سیستم فازی برای تقریب نرخ نفوذ استفاده کردند. برای نیل به این هدف داده‌های ده چاه از سطح زمین تا عمق مورد حفر گردآوری شد. با توجه به گزارش‌های حفاری، از داده‌های نه چاه که دارای دقت بهتری بودند؛ به عنوان پارامترهای ورودی مدل استفاده شد. داده‌ها براساس روش میانگین K^1 به گروه‌هایی تقسیم شدند و در ادامه برای تعیین توابع عضویت

¹ K-means

از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید^۱ استفاده شد. ۷۵ درصد داده‌های هر سازند برای آموزش مدل و ۲۵ درصد باقی مانده برای آزمون مدل به کار برده شد. به منظور ارزیابی مدل ارائه شده، از مدل ترکیبی بورگوین و یانگ با الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. مقایسه میانگین مربعات خطا برای دو مدل، نشان دهنده کارایی بهتر مدل ارائه شده بود (Moradi et al., 2010). یکی از محدودیت‌های مهم این مقاله، عدم بررسی مشخصات سازند در قالب قابلیت حفاری است. هر چند نویسندگان مقاله، مدل را براساس سازندها تفکیک نمودند؛ تا از اثر تغییرات خواص سنگ بر نرخ نفوذ جلوگیری نمایند. بایستی دقت نمود که این فرضیه به دلیل وجود تغییرات در خواص سنگ در طول سازند درست نمی‌باشد.

بهاری و همکاران (۲۰۱۱) مدل بورگوین و یانگ (Bourgoyne and Young, 1974) را، متشکل از ۸ تابع $(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8)$ ، برای میدان گازی خانگیان بکار بردند. عمق واقعی عمودی، نیروی ضربه نازل، وزن روی مته، سرعت دوران، گرادیان فشار منفذی، سائیدگی مته و چگالی معادل در جریان از ده چاه گردآوری شد. با توجه به وجود مشکلات حفاری در یکی از چاه‌ها و عدم اطمینان از صحت داده‌های مربوط به آن، داده‌های این چاه از ادامه مطالعات حذف شد. سپس با به کارگیری الگوریتم ژنتیک ضرایب ثابت مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ با استفاده از داده‌های مورد بررسی تعیین گردید. در ادامه شبکه‌های عصبی تعمیمی رگرسیونی (GRNN^۲) برای یافتن رابطه پیچیده ۸ تابع مورد بررسی با نرخ نفوذ به کار برده شد. برای این منظور از ۷۵ درصد داده‌های هر سازند برای آموزش مدل استفاده و از ۲۵٪ باقی‌مانده برای آزمون مدل استفاده شد. یکی از محدودیت‌های این مطالعه عدم بررسی مهم‌ترین پارامتر یعنی نوع مته مورد استفاده می‌باشد (Bahari et al., 2011). عدم بررسی مناسب مشخصات سازند از محدودیت‌های دیگر این مقاله می‌باشد.

عرب جمالویی و شادی‌زاده (۲۰۱۱) از سه روش، آماری، مدل بورگوین و یانگ (Bourgoyne and Young, 1974) و شبکه عصبی پیشرو برای پیش‌بینی قابلیت حفاری میدان نفتی اهواز استفاده کردند. در این مطالعه نوع مته، مشخصات سازند، شرایط عملیاتی مته (سرعت دوران و وزن روی مته)، سائیدگی دندان مته، هیدرولیک مته، هد هیدرولیکی و چگالی معادل در جریان به عنوان پارامترهای ورودی مدل می‌باشند. تعداد ۳۳۰ نقطه داده از ۳۵ چاه حفاری شده گردآوری شد. به منظور بالا بردن دقت، عرب جمالویی و شادی‌زاده (۲۰۱۱) فرآیند پیش‌پردازی را برای حذف داده‌های دورافتاده استفاده کردند. بدین منظور آن‌ها در مرحله اول از تجارب مهندسی حفاری برای تشخیص تغییرات ناگهانی در فرآیند حفاری استفاده کردند. در مرحله دوم با استفاده از چندین شبکه عصبی که دارای

¹ Simulated Annealing

² Generalized Neural Network

ساختارها و توابع آموزشی مختلف بودند؛ نقاط داده‌ای که در تخمین منجر به مقادیر خارج از محدوده یا دورافتاده برای نرخ نفوذ بودند، تشخیص داده شدند. تعداد نقاط داده بعد از حذف داده‌های دورافتاده به ۳۰۰ نقطه داده رسید. با توجه به ناکافی بودن نقاط داده، عملیات بی‌بعد سازی پارامترهای ورودی و خروجی با استفاده از بیشترین و کمترین مقدار هر پارامتر بین [۱،-۱] انجام شد. فرآیندهای پیش‌پردازش داده موجب بهبود قابل توجهی در دقت مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ گردید. در پایان؛ الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای ورودی با توجه به نتایج شبکه عصبی پیشرو به کار برده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که شبکه عصبی نتایج بهتری را در مقایسه با دو مدل دیگر ارائه می‌دهد (Arabjamaloei and Shadizadeh, 2011). نقطه ضعف این تحقیق را می‌توان در عدم نامشخص بودن چگونگی تعیین مشخصات سازند در مدل دانست. محققان هیچ گونه اشاره‌ای مبنی بر این که چه پارامترهای از سازند مورد بررسی قرار گرفته‌اند، نداشتند.

بتایی و محسنی (۲۰۱۱) شبکه عصبی پسرو را به منظور بهینه‌سازی نرخ نفوذ در میدان نفتی شادگان به کار بردند. به منظور یافتن بهترین ساختار شبکه عصبی، شبکه‌های عصبی دو لایه، سه لایه و چهار لایه مورد بررسی قرار گرفتند. شبکه عصبی سه لایه به دلیل کمترین خطا در این بررسی‌ها برای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. قطر مت، عمق، سرعت دوران، وزن روی مت و وزن گل به عنوان پارامترهای ورودی مدل انتخاب شدند. از تعداد ۱۸۱۰ نقاط داده، ۶۰ درصد برای آموزش شبکه، ۲۰ درصد برای اعتبارسنجی مدل در حین آموزش و ۲۰ درصد دیگر به منظور آزمون مدل بعد از آموزش مورد استفاده قرار گرفت. بتایی و محسنی (۲۰۱۱) محدوده مقادیر وزن گل، وزن روی مت و سرعت دوران را برای عمق‌های مختلف مشخص نمودند. مقادیر بهینه این پارامترها در این محدوده با توجه به نرخ نفوذ بهینه انتخاب شدند (Bataee and Mohseni, 2011). معمولاً شبکه‌های عصبی به منظور پیش‌بینی و طبقه‌بندی داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ اما در این تحقیق از این روش برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای ورودی استفاده شده است. داده‌های این مطالعه مربوط به اعماق صفر تا ۳۴۰۰ متری می‌باشند. مطمئناً این داده‌ها مرتبط به لیتولوژی‌هایی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مختلف می‌باشند؛ بنابراین لحاظ خواص سنگ در مدل نرخ نفوذ الزامی است، درحالی‌که به این مسئله مهم در این تحقیق پرداخته نشده است.

منظمی و همکاران (۲۰۱۲) از شبکه عصبی مصنوعی پیشرو برای پیش‌بینی نرخ نفوذ یکی از میادین نفتی جنوب ایران استفاده کردند. شبکه عصبی با سه لایه پنهان برای تخمین نرخ حفاری در این مطالعه انتخاب شد. به منظور کاهش خطای شبکه، داده‌هایی که دارای همبستگی بالایی بودند از

ادامه مطالعات حذف شدند. پارامترهای ورودی مدل در این مطالعه شامل خواص گل (وزن گل، گرانیوی پلاستیک و درصد مواد جامد)، نرخ جریان، سرعت دوران مته، عمق، وزن روی مته، شیب و قطر چاه می‌باشند. ۳۳۶ نقطه داده از میدان مورد بررسی جمع آوری گردید که ۸۰ درصد این نقاط (۲۶۸ نقطه داده) برای آموزش شبکه و ۱۰ درصد (۳۴ نقطه داده) برای اعتبارسنجی مدل در حین آموزش و ۱۰ درصد دیگر (۳۴ نقطه داده) برای آزمون مدل استفاده شد. نتایج مدل ایجاد شده همخوانی خوبی با نتایج واقعی نشان داد (Monazami et al., 2012). یکی از نقاط ضعف این تحقیق را می‌توان در عدم بررسی تأثیر خواص سازند در نرخ نفوذ دانست. از محدودیت‌های دیگر آن، عدم استفاده از الگوریتم‌های هوشمند جهت بهینه‌سازی پارامترهای شبکه و استفاده از روش آزمون و خطا برای تعیین ساختار شبکه می‌باشد. نتایج پیش‌بینی مدل ارائه شده آن‌ها بر خلاف روش‌های سنتی (روش رگرسیون) همخوانی خوبی را با نتایج واقعی نشان داد.

عامر و ابراهیم (۲۰۱۲) از سه روش، رگرسیون، شبکه عصبی تابع شعاعی پایه^۱ و ماشین یادگیری^۲ برای پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده کردند. هدف از این مطالعه، مقایسه روش‌ها براساس سرعت و دقت در سه مرحله آموزش، اعتبارسنجی و آزمون بود. پارامترهای ورودی در هر سه مدل یکسان و شامل، عمق، سرعت دوران، وزن روی مته، سائیدگی دندانه مته، عدد رینولدز، وزن معادل در جریان و گرادیان فشار منفذی می‌باشند. نتایج مقایسه نشان داد که شبکه عصبی شعاعی پایه از نظر دقت از سایر روش‌ها بهتر عمل می‌کند؛ ولی ماشین یادگیری از نظر سرعت پردازش داده نسبت به سایر روش‌ها بهتر می‌باشد (Amar and Ibrahim, 2012). در این مقاله نیز تأثیر پارامترهای سازند بر روی نرخ نفوذ بررسی نشده است؛ هر چند هدف فقط بررسی روش‌ها از نظر دقت و سرعت بوده است. تلفیق دو روش شبکه عصبی و ماشین یادگیری با الگوریتم‌های بهینه‌سازی، به نظر می‌رسد، می‌تواند ایده‌ای بهتر باشد.

اخلاقی و همکاران (۲۰۱۲) از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در چاه‌های شیبدار میدان نفتی اهواز بهره بردند. عمق، اندازه نازل، وزن روی مته، سرعت دوران، وزن گل و محتوای جامد پارامترهای ورودی و نرخ نفوذ پارامتر خروجی مورد بررسی بودند. بیش از ۳۰۰ نقطه داده از ۶ چاه مایل میدان نفتی مورد بررسی گردآوری شد. قبل از ایجاد مدل، با استفاده از تجربه، داده‌های دورافتاده حذف شدند. نتایج پیش‌بینی همخوانی خوبی را با داده‌های واقعی نرخ نفوذ نشان داد (Akhlaghi and Rezaei, 2012). سه پارامتر مهمی یعنی نوع مته، شیب چاه و مشخصات سازند در

¹ Radial Basis Function (RBF)

² Learning Machine

این مطالعه نادیده گرفته شده است. به نظر می‌رسد اعمال این پارامترها می‌تواند منجر به افزایش دقت مدل تخمین‌گر نرخ نفوذ شود.

نینگ و همکاران (۲۰۱۳) از مدل ترکیبی تحلیل سلسله مراتبی - شبکه عصبی پسر و پیش‌بینی نرخ نفوذ و پیشنهاد مته مناسب استفاده کردند. مقاومت فشاری تک محوره، اندازه مته، نوع مته، ضریب قابلیت حفاری، زمان از دست رفته، وزن روی مته، سرعت دوران، وزن گل و گرانیوی ظاهری پارامترهای ورودی مدل را تشکیل می‌دادند. این داده‌ها از نگارهای برداشت شده از عمق ۵۰۰۰ متری تا عمق ۵۲۳۰ متری استخراج گردیدند. قبل از ورود پارامترهای نرمالیزه شده به شبکه عصبی پسر، به منظور بالا بردن زمان همگرایی شبکه و افزایش دقت پیش‌بینی مدل، از تحلیل سلسله مراتبی به منظور تعیین وزن‌های اولیه نرون‌ها در شبکه عصبی استفاده شد. مدل ترکیبی نسبت به مدل ساده شبکه عصبی همگرایی سریع‌تری را نشان داد. با توجه به پایین بودن نرخ نفوذ از عمق ۵۰۸۰ متری تا عمق ۵۲۰۷ متری، نوع مته از M1365D به HA517G تغییر یافت. نتایج پیش‌بینی برای مته جدید، نشان از افزایش نرخ نفوذ در این محدوده عمقی است (Jing Ning et al., 2013).

دوان و همکاران (۲۰۱۵) مدل نرخ نفوذی را برای پیش‌بینی نرخ حفاری و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی با استفاده از شبکه عصبی پسر و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توسعه دادند. بدین منظور آن‌ها از پارامترهای اختلاف فشار ته چاه، قابلیت حفاری، چگالی گل، وزن روی مته، سرعت دوران و ظرفیت تحویل استفاده کردند. ابتدا با استفاده از شبکه عصبی و داده‌های تنها یک چاه، مدل نرخ نفوذ ایجاد شد. سپس از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات برای بهینه‌سازی پارامترهای قابل کنترل استفاده شد. در این مطالعه به کارگیری مقاومت فشاری تک محوره به عنوان قابلیت حفاری سازند در کنار سایر پارامترها منجر به ارائه نتایج دقیق‌تری از نرخ نفوذ شد (Duan et al., 2015). هرچند قابلیت حفاری سازند تنها با استفاده از یک پارامتر تعیین نمی‌شود.

انصاری و همکاران (۲۰۱۶) به منظور انتخاب بهترین پارامترهای تأثیرگذار در تخمین نرخ نفوذ از تحلیل خطای انتخاب با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره استفاده کردند. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل: ضخامت لایه، گرانیوی، سرعت دوران، فشار پمپ، وزن روی مته، چگالی گل، انحراف چاه، مشخصات یاتاقان، نوع مته، نوع سازند و قطر مته می‌باشند. از میان پارامترهای مورد بررسی، هشت پارامتر اول برای تخمین نرخ نفوذ با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان با کرنل‌های مختلف انتخاب شدند. بهینه‌سازی پارامترهای رگرسیون بردار پشتیبان با استفاده از الگوریتم بهینه-

سازی رقابت استعماری نشان داد که نتایج دقیق‌تری نسبت به سایر رگرسیون‌های بردار پشتیبان با کرنل‌های مختلف ارائه می‌دهد (Ansari et al., 2016).

بزمین‌آبادی و همکاران (۲۰۱۷) برای بررسی اثر مشخصات سنگ در تخمین نرخ نفوذ، علاوه بر پارامترهای عملیاتی از ویژگی‌های سنگ نیز استفاده کردند. پارامترهای به کار رفته در این تحقیق شامل عمق، وزن روی مته، اختلاف فشار ته چاه، سرعت دوران، نرخ جریان، وزن سیال حفاری، سائیدگی دندان مته، تخلخل، چگالی سنگ، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت ویژه سازند، نگار گاما، سرعت صوت فشاری و مقاومت فشاری تک محوره می‌باشند (Bezminabadi et al., 2017). آن‌ها نشان دادند که به کارگیری مشخصات سازند می‌تواند دقت مدل‌های نرخ نفوذ را به طور چشمگیری افزایش دهد. یکی از محدودیت‌های مدل ارائه شده، بررسی تعداد محدودی از پارامترهای عملیاتی است و علاوه بر این مقدار ضریب همبستگی مدل برازش شده نیز پایین می‌باشد. مقایسه بین خطای مدل رگرسیونی نرخ نفوذ با ویژگی‌های ژئومکانیکی و پارامترهای عملیاتی با مدل ایجاد شده از پارامترهای عملیاتی نشان می‌دهد؛ که انتخاب ویژگی درستی برای ساخت مدلی با قابلیت اطمینان بالا انجام نشده است.

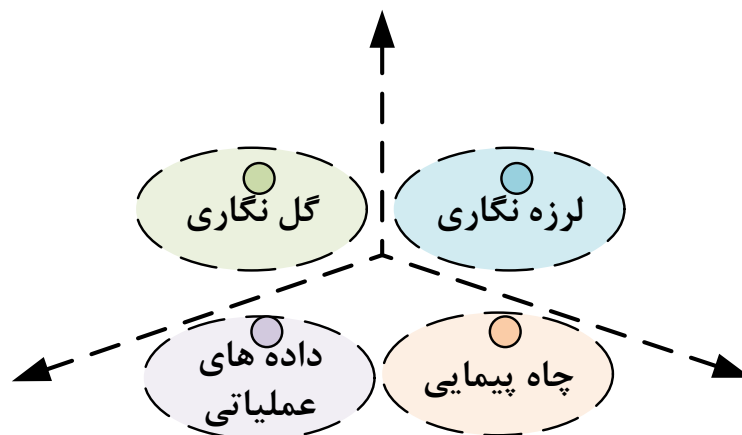
۳-۲. مطالعات صورت گرفته برای تعیین قابلیت حفاری سازند

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تلاش‌های بسیار کمی در زمینه تعیین قابلیت حفاری سازند در حوزه نفت و گاز انجام شده است و در بیشتر این تحقیقات تنها از نگارهای پتروفیزیکی چاه به عنوان شاخصی از ویژگی‌های سنگ استفاده شده است. هیچ یک از قابلیت‌های حفاری تعیین شده تاکنون، در مدل‌های نرخ نفوذ به کار گرفته نشده است؛ تا اعتبار آن‌ها در پیش‌بینی نرخ نفوذ ارزیابی شوند.

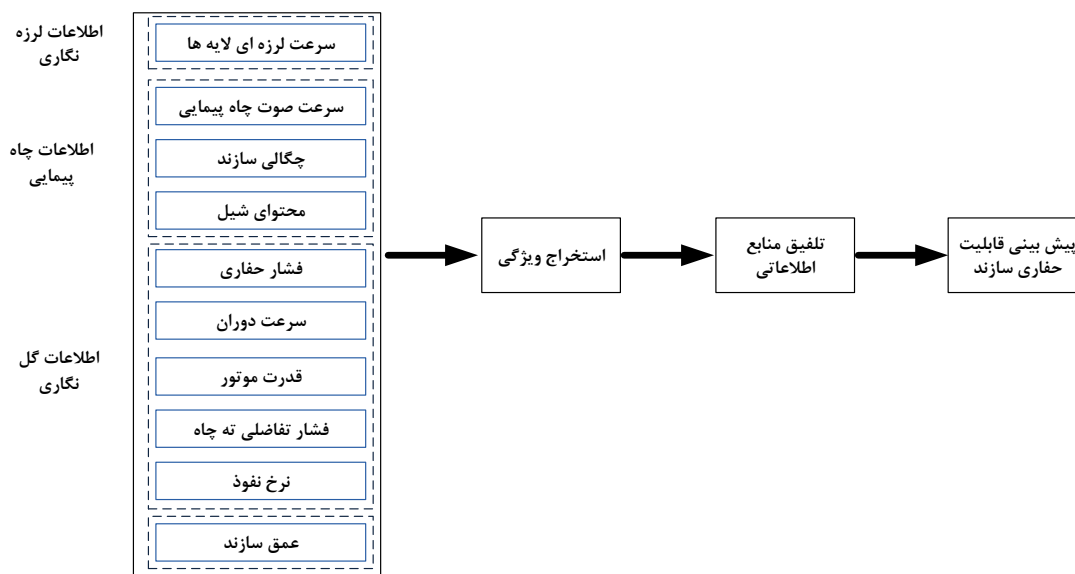
اندرو و همکاران (۲۰۰۷) ابتدا قابلیت حفاری را با استفاده از مدل برگشتی نرخ نفوذ و با استفاده از پارامترهای عملیاتی برای سازندهای مختلف محاسبه نمودند. سپس از همبستگی بین نگار صوتی و قابلیت حفاری برای توسعه مدل تخمین‌گر قابلیت حفاری استفاده کردند (Andrews et al., 2007). یکی از محدودیت‌های این مدل در نظر گرفتن تنها نگار صوتی به منظور تخمین قابلیت حفاری سازند است.

یکی از مهمترین مطالعات صورت گرفته برای تعیین قابلیت حفاری سازند توسط ما (۲۰۱۱) انجام شده است. ما (۲۰۱۱) یک مدل فضایی ناهمگن چند بعدی (شکل ۲-۱) را برای پیش‌بینی مشخصات

ژئومکانیکی، فشار منفذی سازند، قابلیت حفاری سازند، مقاومت سنگ و چینه‌شناسی ارائه کرد. مدل به منظور پیش بینی قابلیت حفاری سازند با پارامترهای سرعت لرزه در لایه، سرعت صوت، چگالی سازند، محتوای شیل، فشار حفاری، سرعت حفاری، قدرت اسب بخار، فشار تفاضلی ته چاه، نرخ نفوذ و عمق سازند تلفیق گردید. ابتدا، تحلیل مؤلفه اصلی برای استخراج ویژگی‌های پارامترها به کار رفت. سپس دو مدل، یکی با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات - ماشین بردار پشتیبان و دیگری با شبکه عصبی پرسرو برای تخمین قابلیت حفاری به کار برده شدند. در این تحقیق دو چاه (zh1 و d1) برای آموزش و اعتبار سنجی مدل استفاده شد؛ به طوری که ابتدا از داده‌های قسمتی از یک چاه (از عمق ۱۵۰۲ متری تا عمق ۴۹۰۰ متری چاه d1) برای آموزش مدل و سپس از قسمت دیگر همان چاه (از عمق ۴۹۲۷ متری تا عمق ۵۰۷۹ متری) برای اعتبار سنجی مدل استفاده شد. در مرحله دوم از داده‌های چاه d1 برای آموزش مدل و از داده‌های چاه zh1 برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. مقایسه نتایج پیش‌بینی دو مدل نشان داد که الگوریتم ازدحام ذرات- رگرسیون بردار پشتیبان بهتر از شبکه عصبی پرسرو در شرایط مختلف است. همچنین این مدل مزیت دقت بالا و قابلیت تعمیم بهتر را نسبت به روش مورد بررسی دیگر دارد. نتایج تحقیق نشان داد که پیش‌بینی براساس ترکیب اطلاعات چند منبعی در مقایسه با تک منبعی می‌تواند نتیجه معتبرتر و قوی‌تری ارائه دهد. همچنین مدل ساخته شده در پیش‌بینی قابلیت حفاری سازند کارایی بالایی نشان داد و دقت آن به حدود ۹۵٪ درصد می‌رسد. در شکل ۲-۲ روند مطالعات ما برای پیش‌بینی قابلیت حفاری نشان داده شده است (Ma, 2011).



شکل ۲-۱. مدل ناهمگن چند بعدی ما (Ma, 2011)



شکل ۲-۲. مراحل مختلف تعیین قابلیت حفاری سازند در مدل پیشنهادی ما (Ma, 2011)

کلیسیدیس (۲۰۱۱) تعامل مته-سنگ را در تعیین قابلیت حفاری سنگ بسیار پر اهمیت شمرد. بر این اساس انرژی ویژه حفاری را مقدار انرژی لازم برای شکست سنگ دانست (Kelessidis, 2011). او رابطه‌ای بین انرژی ویژه حفاری و مقاومت فشاری تک محوره سنگ توسعه داد. سپس با استفاده از وزن روی مته، سرعت دوران و قطر مته به تعیین قابلیت حفاری سنگ پرداخت. هرچند منطق به کارگیری این روش صحیح است؛ اما نرخ نفوذ به کار رفته در رابطه انرژی ویژه توسعه داده شده توسط تیل (Teale, 1965) را به عنوان قابلیت حفاری سنگ در نظر گرفته است. حتی با چشم‌پوشی از این مشکل، کلیسیدیس (۲۰۱۱) قابلیت حفاری را تنها مرتبط با مقادیر پارامترهای عملیاتی دانسته است.

ژو و همکاران (۲۰۱۲) به منظور افزایش نرخ نفوذ و کاهش هزینه‌های حفاری یک سری آزمایش‌های آزمایشگاهی را برای تعیین مشخصات سازند انجام دادند. ویژگی‌های مورد بررسی سازند شامل قابلیت حفاری، سختی، پلاستیسیته، مقاومت فشاری تک محوره و سایندگی سنگ می‌باشند. در ادامه آن‌ها با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی ۳۰ چاه، مدل سه بعدی قابلیت حفاری میدان مورد مطالعه را تشکیل دادند و براساس آن چاه‌هایی که در آینده حفاری خواهند شد ساختار مته مناسب، روش حفاری و پارامترهای حفاری بهینه را پیشنهاد دادند (Zhu et al., 2012).

تاو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از معیار دارکر-پراگر، مدل قابلیت حفاری را برای حفاری در ته چاه نفت و گاز توسعه دادند. برای این منظور آن‌ها از نگارهای پتروفیزیکی برداشت شده در چاه و نتایج آزمایش مته کوچک روی مغزه ماسه سنگی در آزمایشگاه استفاده نمودند. نتایج بررسی نشان داد که فشار سیال به عنوان یک عامل اصلی در کنترل قابلیت حفاری سنگ در ته چاه، ارتباط مستقیم با

قابلیت حفاری (سختی حفاری) سنگ ته چاه دارد (Tao et al., 2014). همچنین آن‌ها نشان دادند که حداقل قابلیت حفاری سنگ در ناحیه‌ای در ته چاه و به فاصله حدود هفتاد درصد شعاع چاه از محور چاه قرار دارد. یکی از محدودیت‌های این تحقیق عدم توجه به ویژگی‌های سنگ و مرتبط دانستن قابلیت حفاری با فشار سیال درون چاه است.

بزمین آبادی و همکاران (۲۰۱۷) رابطه بین هر یک از نگارهای پتروفیزیکی و نرخ نفوذ را با استفاده از روش رگرسیونی ارزیابی کردند و با استفاده از رگرسیون چند متغیره و نگارهای تخلخل (NPHI)، مقاومت ویژه سازند (RT) و زاویه اصطکاک داخلی (FA) رابطه ۲-۲۹ را برای تعیین قابلیت حفاری سنگ توسعه دادند (Bezminabadi et al., 2017). آن‌ها برای اولین بار مفهوم قابلیت حفاری سنگ محاسبه شده از ویژگی‌های سنگ را در مدل نرخ نفوذ به کار بردند. هرچند مقایسه مدل نرخ نفوذ دربرگیرنده قابلیت حفاری سنگ با مدل بدون آن نشان می‌دهد که رابطه درستی برای تعیین قابلیت حفاری سنگ ارائه نشده است.

$$K = \frac{NPHI^{0.2}}{RT^{0.1}FA^{0.3}} \quad 29-2$$

۲-۴. جمع‌بندی

مدل‌های زیادی برای تخمین نرخ نفوذ از نگارهای چاه با استفاده از روش‌های رگرسیونی و هوش مصنوعی توسعه داده شده‌اند. مقایسه روش‌های هوش مصنوعی با روش‌های رگرسیونی نشان می‌دهد که روش‌های هوش مصنوعی بسیار دقیق‌تر هستند. علاوه بر این قابلیت پردازش اثر پارامترهای متعدد در مدت زمان کم را بر روی نرخ نفوذ دارا است. اما در این میان، از مدل‌های رگرسیونی نیز به دلیل قابل درک بودن نحوه اثر هر کدام از پارامترها روی نرخ نفوذ استفاده شده است. مدل بورگوین و یانگ، به دلیل به کارگیری پارامترهای بیشتر و همچنین داشتن ضرایب ثابتی که بایستی با توجه به شرایط میدان مورد مطالعه تعریف شود، نسبت به سایر مدل‌های رگرسیونی دیگر در میان محققین بیشتر مورد توجه بوده است (Anemangely et al., 2017b).

در جدول ۲-۱ پارامترهای به کار رفته توسط محققین مختلف برای تخمین نرخ نفوذ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود محققین کمتر به تأثیر ویژگی‌های سنگ در تخمین نرخ نفوذ پرداخته‌اند. حتی در مدل‌های دربرگیرنده قابلیت حفاری، این پارامتر تنها با استفاده از مقاومت فشاری تک محوره سنگ محاسبه شده است. تنها بزمین آبادی و همکاران (۲۰۱۷) سایر

ویژگی‌های سازند را در تخمین این پارامتر دخیل کرده‌اند. هرچند؛ قابلیت حفاری محاسبه شده در این مطالعه نیز نشان می‌دهد که به نحو مطلوبی تعیین نشده است.

جدول ۱-۲. انواع پارامترهای به کار رفته در تحقیقات مختلف

انرژی ویژه حفاری	پارامتر											محققان	
	عمق	نوع سازند	قطر و نوع منته	گشتاور	وزن روی منته	سرعت دوران	نیروی ضربه نازل	محتوای جامد سیال حفاری	چگالی سیال حفاری	گرانروی سیال حفاری	خوردگی دندانه		قابلیت حفاری
*	*	*			*	*	*		*		*	*	بورگوین و یانگ (Bourgoyne and Young,) (1974)
*	*	*	*		*	*	*		*		*	*	مایدلا و اوهارا (Maldla et al., 1991)
*			*	*	*	*	*						پسیر و فیر (Pessier and Fear, 1992)
*	*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	پیمان و همکاران (Paiaman et al., 2009)
*	*	*	*		*	*	*		*		*	*	مرادی و همکاران (Moradi et al., 2010)
*	*	*			*	*	*		*		*	*	بهاری و همکاران (Bahari et al., 2011)
*	*				*	*			*		*	*	عامر و ابراهیم (Amar and Ibrahim, 2012)
*	*	*			*	*	*	*	*				اخلاقی و رضایی (Akhlaghi and Rezaei,) (2012)
*	*	*	*		*	*				*		*	نینگ و همکاران (Jing Ning et al., 2013)
*	*	*	*		*	*			*	*	*	*	انصاری و همکاران (Ansari et al., 2016)
*	*				*	*	*			*			کشاورز مروجی و نادری (Moraveji and Naderi,) (2016)
*	*	*			*	*	*		*		*	*	انه منگلی و همکاران (Anemangely et al.,) (2017b)
*	*				*	*	*				*	*	بزمین آبادی و همکاران (Bezminabadi et al., 2017)

هرچند؛ محققانی نیز با استفاده از یک یا چند نگار پتروفیزیکی سنگ به تخمین قابلیت حفاری سازند پرداخته‌اند، اما اعتبار این پارامترهای محاسبه شده در مدل‌های نرخ نفوذ ارزیابی نشده است. بر این

اساس می توان گفت که هنوز شاخصی از قابلیت حفاری سنگ که مطابقت خوبی با مدل های نرخ نفوذ دارد ارائه نشده است.

فصل سوم: میادین مورد مطالعه

۳-۱. مقدمه

یکی از چالش‌های بزرگ در پژوهش‌های مربوط به میادین نفتی و گازی، زمان‌بر بودن پروسه دریافت اطلاعات است. در این میان دریافت اطلاعات مربوط به میادین مشترک گازی و نفتی دشوارتر از سایر میادین است. براین اساس به منظور تامین اطلاعات پژوهش حاضر دو شرکت بزرگ نفتی و گازی یعنی شرکت مناطق نفتخیز جنوب و شرکت ملی حفاری مد نظر قرار گرفتند. از آن جایی که شرکت مناطق نفتخیز جنوب در امر همکاری با دانشگاه‌ها نسبت به سایر شرکت‌های نفتی پیش‌تاز بوده است؛ مکاتبات با شرکت مذکور برای دریافت اطلاعات انجام شد. در این فصل به صورت مختصر در مورد پروسه دریافت اطلاعات، ارزیابی داده‌ها به منظور انتخاب چاه‌ها و همچنین به معرفی چاه‌های برگزیده پرداخته خواهد شد.

۳-۲. داده‌های مورد نیاز پژوهش حاضر

اولین قدم در مطالعات ژئومکانیک، ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه‌ها است؛ بنابراین، نیاز به نمودارهای کامل چاه^۱ و نتایج آزمایشگاه مکانیک سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوره و کشش می‌باشد. با این روش می‌توان ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌های مورد مطالعه را استخراج و کالیبره نمود. برای کالیبره کردن فشار منفذی و تنش‌های برجا بایستی آزمون‌های درون چاهی تهیه شود. از اینرو نیاز به نتایج آزمایش ساق مته^۲ یا آزمایش مجدد سازند^۳ برای کالیبره کردن فشار منفذی و آزمایش نشت^۴ و یا توسعه یافته آن^۵ می‌باشد. در نهایت برای اعتبارسنجی پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده بایستی از داده‌های نگار تصویری و هرزروی استفاده شود.

در مرحله بعد برای مدل‌سازی نرخ نفوذ، علاوه بر ویژگی‌های ژئومکانیکی، بایستی داده‌های حفاری شامل گزارش حفاری و نمودارهای گرافیکی تهیه شده در سر چاه، داده‌های مته^۶ و داده‌های گل نگاری تهیه شود.

یازده چاه که دارای داده‌های زمین‌شناسی و نگارهای پتروفیزیک بودند، به صورت اولیه از طرف اداره زمین‌شناسی و پتروفیزیک شرکت مناطق نفتخیز جنوب برای این مطالعه انتخاب شدند. اما بررسی

¹ Fullset

² Drill Stem Test (DST)

³ Repeat Formation Test (RFT)

⁴ Leak-off Test (LOT)

⁵ Extended Leak-off Test (XLOT)

⁶ Bit records

سایر اطلاعات مورد نیاز چاه‌های معرفی شده نشان داد که همه اطلاعات مورد نیاز در این چاه‌ها وجود ندارد. در ادامه نحوه ارزیابی اطلاعات در هر یک از چاه‌های معرفی شده به صورت اختصار بیان شده است.

۳-۲-۱. ارزیابی اولیه اطلاعات چاه‌ها

با توجه به وجود ادارات مختلف در شرکت مناطق نفتخیز جنوب، نمودارهای کامل چاه، تصویربرداری صوتی دو قطبی^۱، آزمون‌های درون چاهی از اداره پتروفیزیک و ارزیابی مخازن، داده‌های مربوط به حفاری (شامل: داده‌های هرزروی و جریان، گل نگاری، گزارش‌های حفاری و داده‌های مته) از اداره حفاری و نمودار گرافیکی چاه‌ها، نمودار تصویری، نتایج مربوط به آزمایشگاه مکانیک سنگ و نمونه مغزه از اداره زمین‌شناسی دریافت شد. در جدول ۳-۱ نام یازده چاه معرفی شده به همراه ارزیابی اطلاعات مورد نیاز در پژوهش حاضر نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود اطلاعات مورد نیاز در هیچ چاهی به طور کامل وجود ندارد. از آنجایی که داده‌های اصلی این پژوهش، داده‌های حفاری، نمودارهای کامل چاه و نتایج آزمایشگاهی روی نمونه‌های مغزه است؛ تنها چهار چاه AzA، KrA، RSA و RSB برای انجام این مطالعه انتخاب شدند.

جدول ۳-۱. بررسی داده‌های مورد نیاز در چاه‌های معرفی شده

اطلاعات مورد نیاز										نام چاه
داده‌های هرزروی و جریان	آزمون‌های درون چاهی	نگار تصویری	مغزه	گزارش‌های حفاری	اطلاعات زمین‌شناسی	داده‌های مته	نگار DSI	نمودارهای کامل چاه	داده‌های گل نگاری	
✓	×	×	×	×	✓	✓	×	✓	×	AjA میدان آغاچاری
✓	×	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	×	ATA میدان آب‌تیمور
✓	×	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	✓	AzA میدان اهواز
✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	KrA میدان کرنج
✓	×	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	✓	RSB میدان رگ‌سفید
✓	×	×	×	×	✓	✓	×	×	×	MnA میدان مارون
✓	×	✓	×	×	✓	✓	×	✓	×	AzB میدان اهواز
✓	×	×	×	×	✓	✓	×	✓	×	KrB میدان کرنج
✓	×	✓	×	✓	✓	✓	×	✓	✓	RSA میدان رگ‌سفید

علامت‌های ✓ و × به ترتیب به معنی وجود و عدم وجود داده در چاه مورد نظر است

¹ Dipole Shear Sonic Imager (DSI)

۳-۲-۲. راه کارهای رفع نواقص داده‌های دریافتی

برخی از نواقص داده‌ها در چاه‌های انتخاب شده را می‌توان براساس اطلاعات چاه‌های دیگر در همان میدان یا سازندهای مشابه در میادین دیگر برطرف نمود. از جمله این اطلاعات، نگار تصویربرداری صوتی دو قطبی و آزمون‌های درون چاهی است. نگار تصویربرداری صوتی دو قطبی تقریباً در پنج درصد از چاه‌های یک میدان برداشت می‌شود (Anemangely et al., 2017a). استفاده از رابطه بین نگارهای پتروفیزیکی و نگار تصویربرداری صوتی دو قطبی می‌تواند راه کار مناسبی برای تهیه این اطلاعات در چاه‌های انتخاب شده باشد. بدین منظور می‌توان از روابط تجربی ارائه شده و یا از مدل‌های هوش مصنوعی توسعه داده شده از داده‌های چاه‌های دیگر استفاده کرد. به منظور کالیبره‌سازی تنش‌های برجا نیز می‌توان از داده‌های چاه‌های مجاور و رژیم تنش منطقه استفاده نمود. با استفاده از این روش همراه با تعیین پنجره ایمن وزن گل به منظور مطابقت با مشاهدات درون چاهی، می‌توان با دقت قابل قبولی تنش‌های برجای منطقه را برآورد نمود.

۳-۳. معرفی چاه‌های مورد مطالعه

تمامی چاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش در جنوب غربی ایران واقع شده است. در شکل ۳-۱ موقعیت میادین مربوط به چاه‌های انتخاب شده در جنوب غربی ایران نسبت به سایر میادین شرکت مناطق نفتخیز جنوب نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود تمرکز میادین جنوب غربی ایران به گونه‌ای است که میادین مورد مطالعه تقریباً در بخش مرکزی آن‌ها قرار گرفته‌اند و علاوه بر این، فواصل میادین در این بخش بسیار کم است. از اینرو می‌توان گفت که مدل توسعه یافته برای قابلیت حفاری و نرخ نفوذ می‌تواند در سایر میادین واقع در جنوب غربی ایران نیز به کار رود. از میادین مورد مطالعه در شکل ۳-۱ مشاهده می‌شود که دو میدان کرنج و رگ سفید فاصله کمتری نسبت به هم دارند؛ بنابراین، احتمال رسیدن به نتایج مشابه در این میادین وجود دارد. لازم به یادآوری است که سایر شرایط مانند نوع و مشخصات دکل به کار رفته نیز در این امر دخیل است.



شکل ۱-۳. موقعیت میادین اهواز، کرنج و رگ سفید نسبت به سایر میادین شرکت مناطق نفتخیز جنوب

۳-۱-۳. چاه AZA

میدان نفتی اهواز در زیر شهر اهواز قرار گرفته است، به طوری که فرودگاه این شهر روی هسته مرکزی تاقدیس قرار می‌گیرد. این میدان در ناحیه فروافتادگی دزفول شمالی قرار دارد. در این فروافتادگی ۴۵ میدان نفتی وجود دارد که تعدادی از این میادین به عنوان میادین بسیار عظیم شناخته شده‌اند؛ که میدان نفتی اهواز یکی از آن‌ها به شمار می‌رود. این میدان شامل چهار مخزن آسماری، ایلام، سروک و خامی (داریان، گدوان و فهلیان) می‌باشد.

چاه AZA یکی از چاه‌های قائم این میدان با عمق ۳۷۰۰ متر می‌باشد که در سال ۱۳۸۷ توسط شرکت ملی حفاری، حفاری شده است. نگارهای پتروفیزیکی در این چاه تنها در محدوده مخزن یعنی سازند آسماری و پابده برداشت شده است. از اینرو محدوده مورد مطالعه در این چاه به این دو سازند محدود خواهد بود. این محدوده با دو نوع مته مختلف با قطر ۸/۵ اینچ و به وسیله دکل فاتح ۵۹ حفر شده است. در جدول ۲-۳ نوع مته‌های مورد استفاده براساس محدوده عمقی مورد مطالعه اشاره شده است.

جدول ۲-۳. نوع مته‌های استفاده شده در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه AZA

نوع مته	محدوده عمقی (متر)
B.Bit	۲۶۴۳ - ۲۵۸۷
PDC	۳۰۸۰ - ۲۶۴۳

۳-۳-۲. چاه KrA

میدان نفتی کرنج در استان خوزستان و در فاصله ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان رامهرمز و ۱۱۵ کیلومتری از شرق اهواز قرار دارد. این میدان از شمال با میدان نفتی پارسی و از جنوب با میدان نفتی آغاجاری همجوار است.

چاه KrA یکی از چاه‌های قائم میدان کرنج با ۳۰۵۰ متر عمق می‌باشد که در سال ۱۳۹۱ توسط شرکت ملی حفاری، حفاری شده است. نگارهای پتروفیزیکی در این چاه در محدوده سازند آسماری و پایده می‌باشد. از اینرو؛ این محدوده برای مطالعه قابلیت حفاری سازند انتخاب شد. این محدوده عمقی تنها با دو نوع مته و به وسیله دکل ۵۵ فاتح حفاری شده است. نوع مته‌های مورد استفاده در این چاه در جدول ۳-۳ ارائه شده است.

جدول ۳-۳. نوع مته‌های استفاده شده در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه KrA

نوع مته	محدوده عمقی (متر)
B.Bit	۲۴۰۴ - ۲۴۰۷
PDC	۲۴۰۷ - ۳۰۲۸

۳-۳-۳. چاه RSA و RSB

میدان رگ سفید در ۱۶۰ کیلومتری جنوب شرق اهواز و در جنوب میدان پازنان و در غرب میدان بی‌بی‌حکیمه واقع شده است. این میدان شامل سه مخزن آسماری، بنگستان و خامی می‌باشد. تاکنون ۱۳۶ حلقه چاه در این میدان حفاری شده که از آن میان ۲۹ حلقه در مخزن بنگستان و ۲ حلقه در مخزن گازی خامی تکمیل شده است. ۵ حلقه چاه حفاری شده در این میدان به مخزن نرسیده است.

چاه‌های RSA و RSB رگ‌سفید از چاه‌های قائم این میدان می‌باشد که به ترتیب در سال ۱۳۸۷ و ۱۳۹۰ توسط شرکت ملی حفاری، حفاری شدند. نگارهای پتروفیزیکی در چاه RSA محدود به سازندهای پایده و سروک و در چاه RSB محدود به سازند آسماری می‌باشد. بنابراین، این سازندها در این دو چاه برای پژوهش حاضر انتخاب شدند. دکل ۵۵ فاتح و ۳۳ فاتح به ترتیب برای حفاری چاه‌های RSA و RSB این میدان استفاده شدند. نوع مته‌های مورد استفاده در محدوده‌های عمقی مورد مطالعه در دو چاه در جدول ۳-۴ ارائه شده است.

جدول ۳-۴. نوع مته‌های استفاده شده براساس محدوده عمقی برای چاه‌های مورد مطالعه در میدان رگ-

سفید

نوع مته	محدوده عمقی (متر)	نام چاه
Junk mill	۲۸۷۷ - ۲۸۷۳	RSA
M20G	۳۲۱۶ - ۲۸۷۷	
MKM57DG	۳۳۹۱ - ۳۲۱۶	
PDC	۲۷۷۸ - ۲۵۴۶	RSB

۳-۴. جمع‌بندی

براساس داده‌های مورد نیاز، از یازده چاه معرفی شده، تنها چهار چاه واقع در سه میدان مختلف انتخاب شدند. این چاه‌ها از نوع چاه‌های توسعه‌ای می‌باشند که اخیراً در میادین مربوطه حفاری شده‌اند. همه داده‌های مورد نیاز در این چاه‌ها وجود ندارد. براین اساس چاه‌هایی که دارای داده‌های اصلی تحقیق؛ یعنی نگارهای پتروفیزیکی و پارامترهای عملیاتی، می‌باشند برای بررسی در این مطالعه انتخاب شدند.

بررسی موقعیت میادین مورد مطالعه نشان داد که این میادین در بخش مرکزی میادین جنوب‌غربی ایران واقع شده‌اند. علاوه‌براین میادین جنوب‌غربی ایران بسیار نزدیک به هم می‌باشند. به این دلیل می‌توان گفت که مدل نهایی توسعه داده شده برای قابلیت حفاری و نرخ نفوذ می‌تواند با دقت خوبی در سازندهای مشابه سایر میادین نیز به کار روند. هرچند لازمه این امر، داشتن داده‌های آموزش بیشتر و بررسی مدل آموزش دیده در سایر میادین است.

فصل چهارم: مدل سازی یک بعدی چاهها

۴-۱. مقدمه

در صنایع بالادستی نفت و گاز، اولین گام برای انجام هر فرآیندی وابسته به ژئومکانیک، ساخت مدل مکانیکی زمین^۱ است (Keshavarzi and Jalili, 2014). در واقع، مدل مکانیکی زمین نمایش عددی خواص مکانیکی سنگ، همچنین شرایط تنش برای یک لیتولوژی معین یا بخشی از یک چینه‌شناسی در یک میدان است (Plumb et al., 2000) که می‌تواند کمک زیادی برای غلبه بر مشکلات ژئومکانیکی ناشی از فشار بیش از حد سازندی، ناپایداری دیواره چاه، تولید ماسه، فشردگی مخزن، برش لوله جداری و ناکامی شکست هیدرولیکی، کند. در این فصل به مراحل مختلف ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه اشاره و سپس به کالیبره‌سازی مدل ژئومکانیکی ایجاد شده با استفاده از مشاهدات درون چاهی پرداخته خواهد شد.

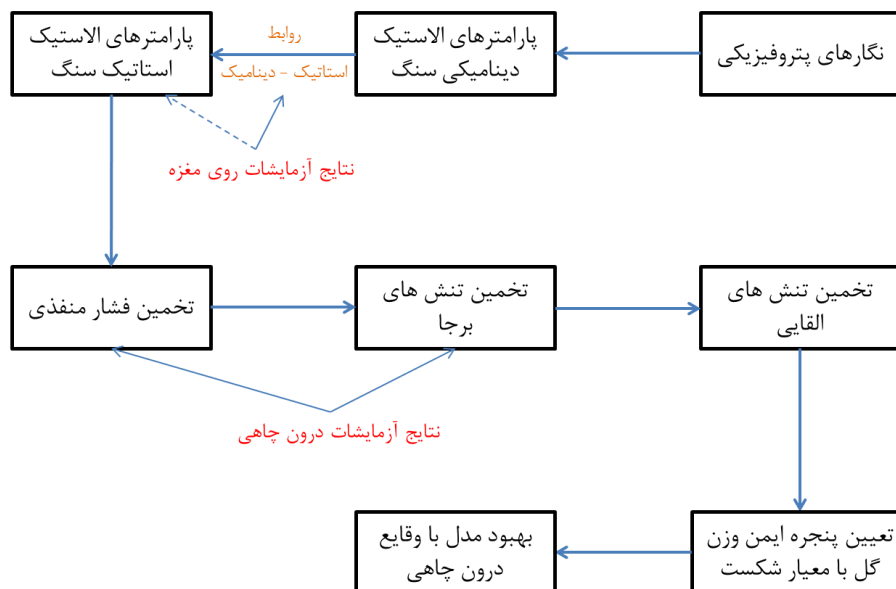
۴-۲. فرآیند مدل‌سازی یک بعدی

به طور کلی، مدل ژئومکانیکی خواص الاستیک دینامیکی را به خواص استاتیک معادل آن مرتبط می‌سازد (Keshavarzi and Jalili, 2014). سپس این خواص الاستیک استاتیک برای تعیین مقاومت سازند و تنش‌های برجا استفاده می‌شود (Rahim et al., 2003). یک مدل مکانیکی زمین شامل پروفایل عمقی خواص الاستیک سنگ، نوع سنگ و سازند، هندسه چاه، فشار منفذی و تنش‌ها است.

در شکل ۴-۱ فلوچارت ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه نشان داده شده است. برای محاسبه پارامترهای استاتیک سنگ، لازم است پارامترهای دینامیک از یک سری نگارهای پتروفیزیکی محاسبه شود. نکته مهم، تبدیل ضرایب دینامیک به استاتیک می‌باشد؛ زیرا براساس شرایط زمین‌شناسی و نوع سازند، بایستی رابطه مناسب آن انتخاب شود. براین اساس، عموماً از نتایج آزمایش‌های روی مغزه برای انتخاب رابطه مناسب و یا ایجاد مدلی برای تبدیل ضرایب دینامیک به استاتیک استفاده می‌شود. در مرحله بعد، فشار منفذی با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی (شامل نگار مقاومت، سرعت موج صوتی و تخلخل) و یا آزمایش‌های درون چاهی محاسبه می‌شود. در صورت استفاده از نگارهای پتروفیزیکی نیاز است مقادیر بدست آمده برای فشار منفذی با فشار منفذی اندازه‌گیری شده در چند نقطه از چاه کالیبره شود. در مرحله بعد تنش‌های برجا با استفاده از نتایج محاسبات قبلی تخمین زده می‌شود. برای کالیبراسیون نتایج تخمین تنش‌های برجا نیاز است از آزمایش‌های درون چاهی استفاده شود.

¹ Mechanical Earth Model (MEM)

سپس از این تنش‌ها برای محاسبه تنش‌های القایی اطراف چاه استفاده می‌شود که در نتیجه حفر چاه ایجاد شده‌اند. در مرحله آخر، از معیارهای شکست سنگ برای محاسبه حد بالا و پایین وزن گل مورد نیاز به منظور حفظ پایداری دیواره چاه استفاده می‌شود و با مقایسه آن با وقایع رخ داده در چاه، دقت مدل بهبود داده می‌شود.



شکل ۴-۱. مراحل ساخت مدل ژئومکانیکی یک بعدی چاه

۴-۲-۱. داده‌های مورد نیاز

گستره وسیعی از داده‌ها شامل نگارهای پتروفیزیکی، داده‌های حفاری، آزمایش‌های روی مغزه و آزمایش‌های درون چاهی، می‌تواند برای ساخت مدل ژئومکانیکی به کار برده شود. از آنجایی که عملیات مغزه‌گیری زمان‌گیر است و هزینه بالایی به همراه دارد، مغزه‌ها تنها در فواصل محدودی در دسترس هستند. از اینرو؛ نگارهای پتروفیزیکی به دلیل پیوستگی داده‌ها در طول چاه به عنوان ورودی اصلی مورد نیاز در ساخت مدل‌های ژئومکانیکی به شمار می‌رود. البته داده‌های محدود مغزه می‌تواند برای کالیبراسیون پارامترهای بدست آمده از نگار استفاده شود. همچنین داده‌های حفاری مانند وزن گل، نواحی هرزروی گل، ریزش و شکستگی کششی دیواره چاه و نفوذ سیال به درون چاه می‌تواند در بهبود دقت مدل کمک بسزایی نماید.

در جدول ۴-۱ به منابع اطلاعاتی مورد نیاز برای ساخت مدل ژئومکانیکی اشاره شده است. نگارهای پتروفیزیکی لازم در این فرآیند شامل نگار گاما، چگالی، تخلخل، موج صوتی فشاری و برشی می‌باشند. علاوه بر این؛ نگار تصویری در کنار نگار کالیپر چند بازویی و همچنین گزارش‌های روزانه حفاری نیز

برای مشخص کردن وقایع درون چاهی مورد نیاز می‌باشند. از داده‌های گل نگاری، پروفایل عمقی وزن گل و قطر مته مورد استفاده بایستی تهیه شود. نتایج آزمایشگاهی مغزه شامل آزمایش مقاومت تک محوری و مقاومت کششی برزبلی برای تعیین روابط تبدیل ضرایب الاستیک دینامیک سنگ به معادل استاتیک آن بسیار ضروری است. همچنین، آزمایش‌های درون چاهی برای کالیبراسیون فشار منفذی و تنش‌های برجا نیاز می‌باشد.

با توجه به عدم وجود سرعت موج برشی در چاه‌های مورد مطالعه، لازم است برای تعیین کندهای موج برشی سازندهای مورد مطالعه از نگارهای پتروفیزیکی تخمین زده شود؛ بنابراین، در ادامه به تخمین سرعت موج برشی پرداخته خواهد شد.

جدول ۴-۱. منابع اطلاعاتی رایج مورد استفاده در ساخت مدل مکانیکی زمین (Plumb et al., 2000)

منابع دیگر	نگارهای منبع	خواص سنگ
خرده‌های حفاری ^۲ ، توالی چینه‌شناسی، حفره‌ها	نگار گاما، چگالی، مقاومت، موج صوتی فشاری	چینه‌شناسی مکانیک ^۱
سرعت فاصله‌ای حاصل از داده‌های لرزه‌ای، آزمون یکپارچگی سازند، گزارش روزانه حفاری	نگار صوتی فشاری، مقاومت، برداشت لرزه‌ای مرجع ^۳	فشار منفذی
خرده‌های حفاری	چگالی بالک	تنش روبراه
فشار منفذی، آزمایش نشت ^۵ ، آزمایش نشت توسعه یافته، آزمایش شکست کوچک ^۶ ، آزمون تزریق نرخ-پله‌ای ^۷ ، گزارش روزانه حفاری، مدلسازی	موج صوتی فشاری و برشی، ابزار تنش سیمی ^۴	تنش افقی حداقل
فشار منفذی، مقاومت سنگ	موج صوتی فشاری و برشی	تنش افقی حداکثر
داده‌های لرزه‌ای سه بعدی، نقشه ساختارها	نگار تصویری، ناهمسانی سرعت در جهات	جهت تنش
آزمایش‌های روی مغزه، حفره‌ها	موج صوتی فشاری و برشی، چگالی بالک	پارامترهای الاستیک: مدول یانگ، مدول برشی، نسبت پواسون
آزمایش‌های روی مغزه، حفره‌ها	موج صوتی فشاری و برشی، چگالی بالک، چینه‌شناسی مکانیک	پارامترهای مقاومت سنگ: مقاومت تک محوری و زاویه اصطکاک داخلی
گزارش‌های روزانه حفاری، حفره‌ها	نگار تصویری، کالیبر چند بازویی	مکانیزم شکست

¹ Mechanical stratigraphy

² Cuttings

³ Check-shot survey

⁴ Wire-line stress tool

⁵ Leak-off test

⁶ Micro-frac test

⁷ Step-rate injection tests

۴-۲-۱-۱. تخمین موج برشی

سرعت موج برشی برخلاف سرعت موج فشاری به دلیل هزینه بالا یا دلایل تکنیکی، تنها در تعداد محدودی از چاه‌های یک میدان برداشت می‌شود. این امر موجب شد تلاش‌های متعددی برای تخمین موج برشی از نگارهای پتروفیزیکی صورت گیرد. برخی از محققان روابط تجربی را برای تخمین موج برشی ارائه دادند (Brocher, 2008, 2005; Carroll, 1969; Castagna et al., 1985; Castagna and) (Backus, 1993; Eskandari et al., 2003; Pickett, 1963). هر چند این روابط بسیار ساده هستند اما با توجه به اینکه از داده‌های میداین خاصی برای ساخت آن‌ها استفاده شده است بکارگیری آن‌ها برای میداین دیگر با عدم اطمینان همراه است. البته بایستی اشاره نمود که در اکثر روابط تجربی تنها از سرعت موج فشاری برای این تخمین استفاده شده است. محققانی نیز از هوش مصنوعی برای توسعه مدلی به منظور تخمین سرعت موج برش استفاده کرده‌اند (Bagheripour et al., 2015;) (Maleki et al., 2014; Nourafkan and Kadkhodaie-Ilkhchi, 2015; Rezaee et al., 2007). در این مدل‌ها، برخلاف اکثر مدل‌های تجربی، علاوه بر سرعت موج برشی از سایر نگارهای پتروفیزیکی نیز استفاده شده است. مقایسه مدل‌های تجربی و مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نشان می‌دهد که روش هوش مصنوعی از دقت و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است. پیش‌پردازش داده به منظور حذف داده‌های دورافتاده و انتخاب ویژگی‌های برتر می‌تواند گام موثری برای تقویت عملکرد روش‌های هوش مصنوعی باشد. این عمل علاوه بر افزایش سرعت پردازش داده، مانع بیش‌برازش مدل نیز می‌شود.

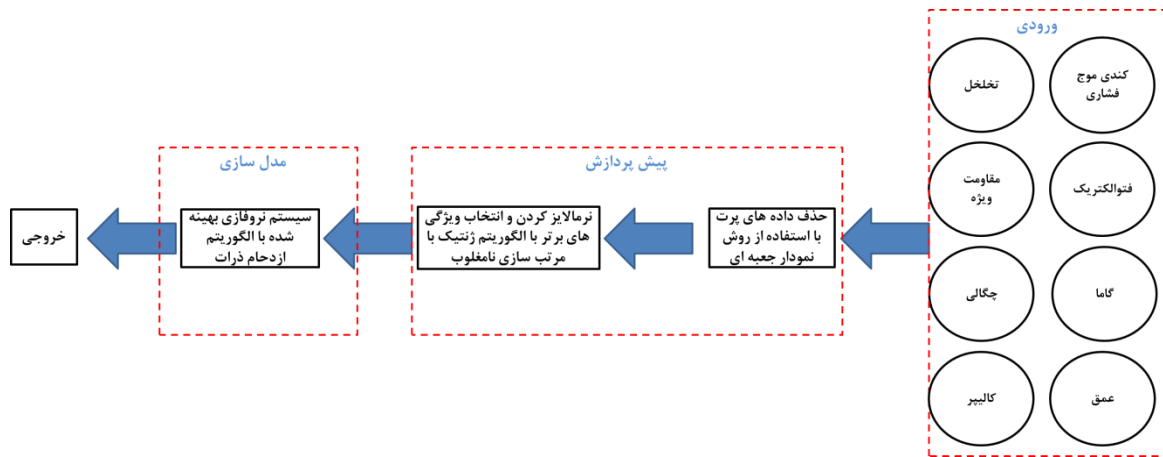
در این بخش، با توجه به عملکرد خوب روش‌های هوش مصنوعی، از سیستم استنتاج فازی عصبی سازگار^۱ برای تخمین زمان سیر (کندی) موج برشی استفاده خواهد شد. در شکل ۴-۲ مراحل آموزش مدل فازی عصبی نشان داده شده است. به منظور بهبود سرعت و دقت سیستم فازی عصبی، از روش نمودار جعبه‌ای^۲ برای حذف داده‌های دورافتاده^۳ و از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب^۴ برای انتخاب ویژگی‌های برتر بهره برده خواهد شد.

¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

² Boxplot

³ Outlier

⁴ Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)



شکل ۴-۲. مراحل تخمین کندی موج برشی برای چاه‌های مورد مطالعه

برای ایجاد و آموزش مدل نروفازی از نگارهای پتروفیزیکی دو چاه دیگر در میداین آب تیمور و اهواز استفاده خواهد شد. به دلیل محرمانه بودن اطلاعات دریافتی، چاه میدان آب تیمور، AT-Dt1 و چاه میدان اهواز، Az-Dt1 نامگذاری شدند. میدان آب تیمور از میداین کربناته و میدان اهواز از میداین ماسه سنگی ایران محسوب می‌شوند؛ بنابراین، از مدل چاه AT-Dt1 برای تخمین کندی موج برشی در چاه‌های میداین کربناته و از مدل چاه Az-Dt1 برای تخمین کندی موج برشی در چاه‌های میداین ماسه سنگی استفاده خواهد شد. تعداد نقاط داده در چاه میدان آب تیمور و میدان اهواز به ترتیب برابر ۱۰۴۲ و ۲۶۳۲ می‌باشد. در جدول ۴-۲ برخی شاخص‌های آماری داده‌های ورودی و خروجی مورد استفاده برای تخمین کندی موج برشی به تفکیک نام هر چاه ذکر شده است.

جدول ۴-۲. برخی از شاخص‌های آماری پارامترهای ورودی و خروجی در داده‌های دو چاه AT-Dt1 و Az-

نام چاه	ورودی / شاخص آماری								
	عمق (m)	کالیبر (in)	فتوالکتریک (B/E)	گاما (GAPI)	مقاومت ویژه (OHMM)	تخلخل (V/V)	چگالی (G/C3)	کندی موج فشاری (us/ft)	کندی موج برشی (us/ft)
AT-Dt1	مقدار کمینه	۳۳۱۵/۰۰	۳/۸۸	۲/۵۱	۳/۷۸	۰/۳۶	۲/۱۴	۴۸/۵۴	۸۹/۶۹
	چارک اول	۳۳۵۴/۶۷	۶/۴۳	۴/۵۱	۱۲/۳۵	۳۲/۴۷	۲/۴۴	۵۶/۴۵	۱۰۷/۶۲
	میانگین	۳۳۹۴/۳۳	۶/۷۶	۴/۵۷	۲۳/۲۱	۸۵/۳۹	۰/۲۸	۲/۵۱	۱۱۴/۲۱
	چارک سوم	۳۴۳۳/۹۹	۷/۳۷	۴/۸۶	۳۲/۱۸	۹۲/۳۳	۰/۳۰	۲/۶۱	۱۲۰/۳۰
	مقدار بیشینه	۳۴۷۳/۶۵	۸/۶۹	۵/۵۳	۵۴/۰۲	۱۸۰/۱۳۲	۰/۳۷	۳/۰۶	۱۴۲/۵۹
Az-Dt1	مقدار کمینه	۳۵۱۴/۸۰	۱/۷۷	۳/۵۰	۳/۸۰	۴/۹۸	۱/۹۹	۴۷/۰۱	۹۰/۵۰
	چارک اول	۳۶۱۵/۰۴	۶/۲۱	۴/۷۹	۱۸/۳۰	۷۹/۳۶	۲/۵۲	۵۱/۸۸	۹۸/۲۵
	میانگین	۳۷۱۵/۲۸	۶/۴۸	۴/۹۴	۳۰/۷۴	۱۵۹/۴۶	۰/۰۵۷	۲/۵۹	۱۰۳/۵۱
	چارک سوم	۳۸۱۵/۵۳	۶/۵۴	۵/۱۴	۳۹/۸۴	۲۱۰/۰۱	۰/۰۶۷	۲/۶۸	۱۰۶/۴۱
	مقدار بیشینه	۳۹۱۵/۷۷	۱۱/۶۴	۵/۷۳	۱۴۱/۳۱	۹۹۲/۸۶	۰/۶۰۲	۲/۷۸	۱۳۲/۲۸

برای حذف داده‌های دورافتاده، از روش رسم نمودار جعبه‌ای (یا روش توکی^۱) استفاده شد. براین اساس، ابتدا برد چارک‌ها (H) با استفاده از چارک اول (Q_1) و سوم (Q_3) با استفاده از رابطه ۱-۴ تعیین می‌شود. سپس، حد پایین داخلی (LIF) و حد بالای داخلی (UIF)، با استفاده از ضریب k که عموماً برابر ۱/۵ می‌باشد، محاسبه می‌شود (روابط ۲-۴ و ۳-۴). داده‌هایی که از حد پایین داخلی مقدار کمتر و از حد بالای داخلی مقدار بیشتری داشته باشند به عنوان داده دورافتاده محسوب می‌شوند و بایستی از داده‌های مدل حذف شوند. با اعمال روش نمودار جعبه‌ای روی داده‌های هر دو چاه، ۱۹۵ نقطه داده از چاه AT-Dt1 و ۴۹۰ نقطه داده از چاه Az-Dt1 به عنوان داده‌های دورافتاده شناسایی شدند.

$$\begin{aligned} H &= Q_3 - Q_1 & 1-4 \\ LIF &= Q_1 - kH & 2-4 \\ UIF &= Q_2 + kH & 3-4 \end{aligned}$$

از آنجایی که تفاوت در واحدهای متغیرهای مورد مطالعه می‌تواند روی مقیاس آن‌ها تأثیر بگذارد. مقادیر بزرگ یک ورودی ممکن است بر تأثیر سایر ورودی‌ها روی نتیجه مدل غالب شود و در نتیجه ویژگی‌های مناسبی انتخاب نشوند. لذا بعد از حذف داده‌های دورافتاده، داده‌ها با استفاده از رابطه ۴-۴ بین ۰ و ۱ نرمالیزه شدند.

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad 4-4$$

در ادامه، از روش تلفیق شبکه عصبی پرسپترون چند لایه با الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای انتخاب پارامترهای ورودی برتر در تخمین کندی موج برشی از داده‌های هر چاه به صورت جداگانه استفاده و کمینه‌سازی تعداد ورودی‌های مدل تخمین‌گر و خطای تخمین به عنوان اهداف الگوریتم در نظر گرفته شد. خطای تخمین براساس مقادیر خروجی مدل (O) و مقدار واقعی (T) با روش میانگین مربعات خطا^۲ (MSE) با استفاده از رابطه ۴-۵ محاسبه شد. شبکه عصبی پرسپترون چند لایه در این الگوریتم وظیفه تخمین کندی موج برشی براساس پارامترهای ورودی انتخاب شده توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب را به عهده دارد. از آنجایی که، شبکه عصبی در تکرار-های مختلف به ازای مقادیر اولیه پارامترهای وزن و بایاس خود به جواب‌های بهینه مختلف می‌رسد، لذا در هر انتخاب پارامتر(های) ورودی، شبکه عصبی پنج بار متوالی اجرا می‌شود و میانگین مقادیر

¹ Tukey's method

² Mean Square Error

خطای این پنج اجرا به عنوان خطای مربوط به انتخاب آن پارامتر(های) ورودی در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه ۷۰٪ از داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون در نظر گرفته شده است، دو مقدار برای خطا (خطای مرحله آموزش (MSE_{Train}) و آزمون (MSE_{Test})) برای هر ورودی انتخاب شده وجود دارد؛ بنابراین، برای انتخاب ویژگی‌های برتر، دو مقدار خطا با استفاده از رابطه ۴-۶ تلفیق شد. رابطه مشابه (یعنی رابطه ۴-۷) نیز برای تلفیق مقادیر ضرایب تعیین (R^2) هر مدل استفاده شد. در این روابط مقادیر وزن‌های مرحله آموزش (W_{Train}) و آزمون (W_{Test}) به ترتیب برابر ۰/۴ و ۰/۶ در نظر گرفته شد.

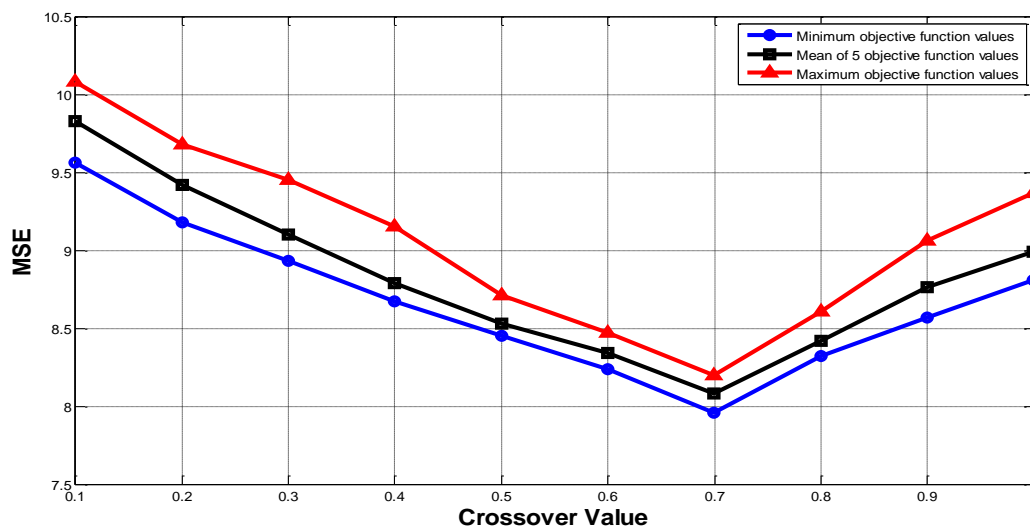
$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - O_i)^2 \quad ۵-۴$$

$$Error = W_{Train} \times MSE_{Train} + W_{Test} \times MSE_{Test} \quad ۶-۴$$

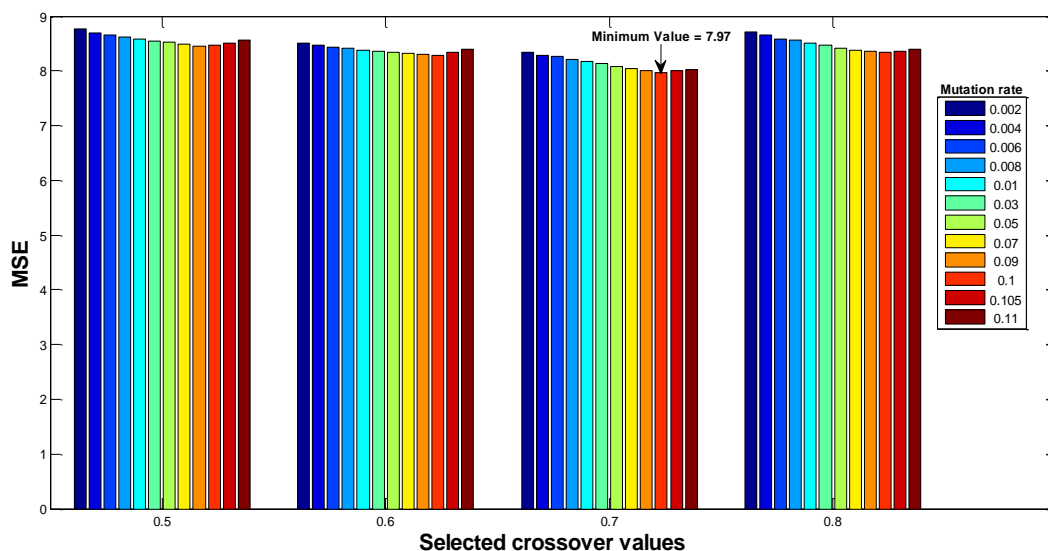
$$R^2 = W_{Train} \times R_{Train}^2 + W_{Test} \times R_{Test}^2 \quad ۷-۴$$

در این مطالعه به منظور انتخاب مقادیر بهینه نرخ تقاطع و جهش، تحلیل حساسیت روی این دو پارامتر صورت گرفت. با توجه به اینکه نرخ جهش نسبت به نرخ تقاطع تأثیر کمتری در سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک دارد (Siriwardene and Perera, 2006)؛ مقدار ثابت ۰/۰۸ برای نرخ جهش در نظر گرفته شد و مقادیر متفاوتی برای نرخ تقاطع بین ۰/۱ تا ۱ با گام ۰/۱ در نظر گرفته شد. مقادیر خطای بدست آمده از مدل به ازای مقادیر مختلف نرخ تقاطع در شکل ۴-۳ (الف) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ کمترین مقادیر خطا برای نرخ‌های تقاطع ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷ و ۰/۸ بدست آمده است. بنابراین در مرحله بعد در این نرخ‌های تقاطع بدست آمده، مقادیر متفاوتی برای نرخ جهش بین ۰/۰۰۲ تا ۱/۱ لحاظ شد. در شکل ۴-۳ (ب) مقادیر خطای حاصل از الگوریتم به ازای مقادیر نرخ‌های جهش متفاوت، در نرخ‌های تقاطع بدست آمده، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود کمترین مقدار خطا در نرخ تقاطع ۰/۷ و برای نرخ جهش ۰/۱ مشاهده شده است. اندازه جمعیت و تعداد تکرارهای الگوریتم نیز به ترتیب برابر ۴۰ و ۵۰ لحاظ شد. این مقادیر براساس تحلیل حساسیت انجام شده روی پارامترهای الگوریتم بدست آمدند. شبکه عصبی مورد استفاده در این الگوریتم شامل سه لایه پنهان است که به ترتیب ۴، ۳ و ۳ نرون در لایه‌های اول تا سوم قرار دارند. این ساختار بر مبنای روش آزمون و خطا تعیین و الگوریتم لونیگ-مارکوت^۱ به عنوان الگوریتم آموزش شبکه عصبی انتخاب شد.

¹ Levenberg-Marquardt



(الف)

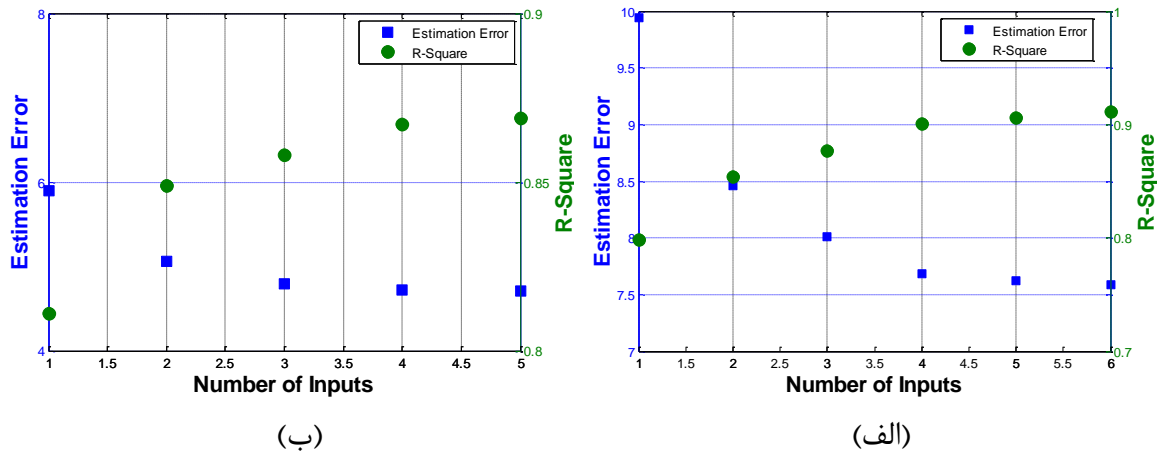


(ب)

شکل ۴-۳. میانگین مربعات خطای بدست آمده به ازای مقادیر مختلف نرخ تقاطع (الف) و جهش (ب)

در شکل ۴-۴ نمودار خطا و ضریب تعیین خروجی از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای تعداد ورودی‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود مقادیر خطا با افزایش تعداد ورودی‌ها کاهش می‌یابد ولی این مقدار کاهش از یک تعداد ورودی به بعد روندی کاهشی دارد. در جدول ۴-۳ و جدول ۴-۴ ویژگی‌های انتخاب شده به ازای تعداد ورودی‌های مختلف برای دو چاه مورد مطالعه اشاره شده است. همان‌طور که در این جداول مشاهده می‌شود، میزان تغییرات خطا و ضریب تعیین میان مدل‌هایی با چهار ورودی بالاتر ناچیز است؛ بنابراین، چهار پارامتر ورودی کندی موج فشاری، تخلخل، چگالی و عمق از چاه AT-Dt1 و چهار پارامتر کندی موج

فشاری، تخلخل، چگالی و پرتو گاما از چاه Az-Dt1 در مرحله بعد به عنوان ورودی مدل فازی-عصبی استفاده خواهند شد.



شکل ۴-۴. نمودار خطا و ضریب تعیین به ازای تعداد ورودی‌های مختلف برای چاه (الف) AT-Dt1 و (ب) Az-Dt1

جدول ۴-۳. خروجی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای چاه AT-Dt1 (پارامترهای انتخاب شده پررنگ شدند)

R-Square	MSE	پارامترهای انتخاب شده	تعداد ورودی‌ها
۰/۷۹۸	۹/۹۴	DTCO	۱
۰/۸۵۴	۸/۴۶	DTCO, Depth	۲
۰/۸۷۷	۸/۰۱	DTCO, Depth, NPHI	۳
۰/۹۰۱	۷/۶۸	DTCO, Depth, NPHI, RHOB	۴
۰/۹۰۶	۷/۶۲	DTCO, Depth, NPHI, RHOB, PEF	۵
۰/۹۱۱	۷/۵۹	DTCO, Depth, NPHI, RHOB, PEF, RT	۶

جدول ۴-۴. خروجی الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای چاه Az-Dt1 (پارامترهای انتخاب شده پررنگ شدند)

R-Square	MSE	پارامترهای انتخاب شده	تعداد ورودی‌ها
۰/۸۱۱	۵/۸۹۱	DTCO	۱
۰/۸۶۹	۵/۰۶۳	DTCO, NPHI	۲
۰/۹۰۶	۴/۷۹۸	DTCO, NPHI, RHOB	۳
۰/۹۱۱	۴/۷۲۳	DTCO, NPHI, RHOB, GR	۴
۰/۹۱۵	۴/۷۰۹	DTCO, NPHI, RHOB, GR, RT	۵

امروزه استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری در مسائل کاربردی نشان داده است که این الگوریتم‌ها از قابلیت خوبی نسبت به الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک برخوردارند؛ بنابراین، از

الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری ازدحام ذرات به منظور آموزش سیستم استنتاج فازی عصبی سازگار و بهینه‌سازی مقادیر پارامترهای توابع عضویت استفاده خواهد شد. برای نیل به این هدف، ریشه میانگین مربعات خطا^۱ به عنوان تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تعریف شد. جمعیت ذرات و تعداد تکرارهای این الگوریتم برای داده‌های چاه آب تیمور به ترتیب برابر ۱۲۰ و ۳۰۰ لحاظ و برای داده‌های چاه اهواز تنها جمعیت ذرات برابر ۲۰۰ جایگزین شد. این مقادیر براساس تحلیل حساسیت انجام شده روی دو پارامتر مذکور نشان داد که می‌تواند با سرعت پردازش مناسب منتج به بالاترین دقت در جواب شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - O_i)^2} \quad ۸-۴$$

طراحی اولیه سیستم فازی با استفاده از جدول جستجو^۲ انجام می‌شود. سپس الگوریتم بهینه‌سازی برای تعیین وزن‌های هر یک از قوانین فازی استفاده می‌شود. به منظور ایجاد قوانین فازی با استفاده از این روش، فضای ورودی و خروجی بایستی به تعدادی زیرفضای^۳ فازی تقسیم شود. توابع زیادی برای تعیین مجموعه‌های فازی وجود دارند که از میان آن‌ها توابع گوسی^۴ و زنگوله‌ای^۵ به دلیل ایجاز^۶ و همواری^۷، از محبوبیت بیشتری نسبت به سایر توابع برخوردارند (Singh et al., 2012a, b). هرچند تابع زنگوله‌ای با داشتن یک پارامتر اضافی، در مقایسه با تابع گوسی، با تنظیم پارامتر اضافی می‌تواند برای بدست آوردن مجموعه‌های غیرفازی استفاده شود. لذا از تابع عضویت گوسی برای تعیین مجموعه فازی استفاده شد. تابع عضویت گوسی (μ) با داشتن دو پارامتر، مرکز (c) مجموعه فازی و انحراف معیار (σ) مجموعه فازی، به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$\mu_{A_i} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - c_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad ۹-۴$$

برای تعیین مراکز مجموعه فازی روش خوشه‌بندی فازی با میانگین c به کار برده شد. این روش داده‌ها را به تعداد خوشه معین تقسیم نموده و مراکز هر خوشه را مشخص می‌کند. برای تعیین انحراف معیار هر خوشه از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شد. تعداد خوشه‌ها (تعداد توابع عضویت) براساس

¹ Root Mean Squared Error (RMSE)

² Look up table

³ Subspace

⁴ Gaussian

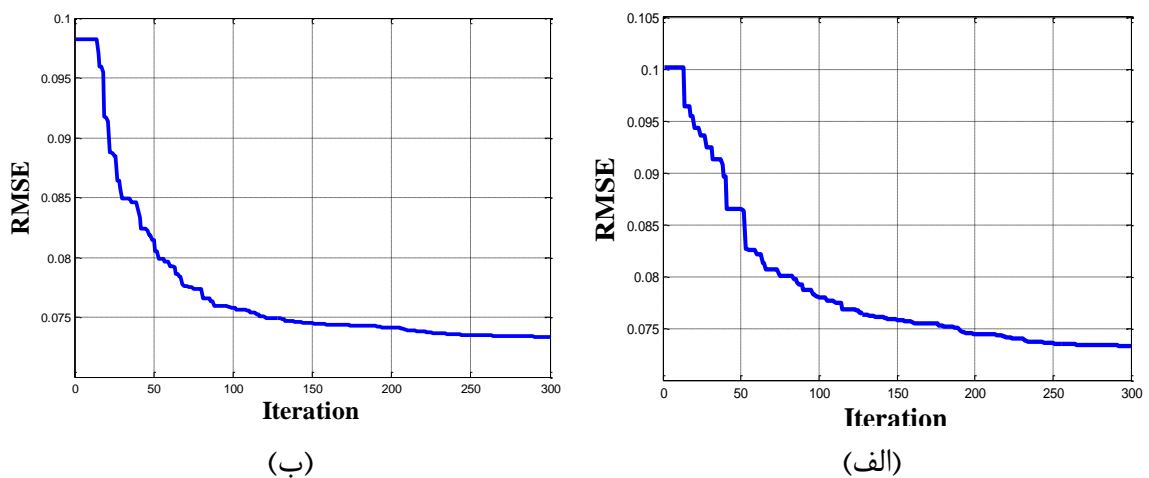
⁵ Bell

⁶ Conciseness

⁷ Smoothness

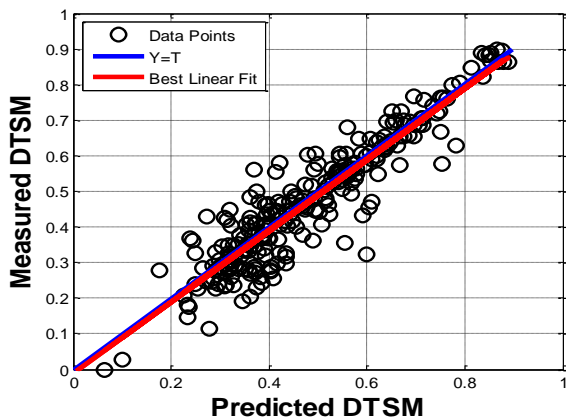
نتایج تحقیقات نورفکن و کدخدایی ایلخچی (۲۰۱۵) برابر ۵ در نظر گرفته شد. آن‌ها نشان دادند که براساس دو معیار، سرعت پردازش داده و خطای مدل، استفاده از ۵ خوشه برای هر پارامتر ورودی علاوه بر سرعت عملکرد قابل قبول، از دقت خوبی نیز برخوردار است.

در شکل ۴-۵ نرخ کاهش خطا در مرحله آموزش براساس داده‌های دو چاه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمودار نرخ کاهش خطا از تکرار ۲۵۰ به بعد تقریباً افقی است و این مطلب گویای آن است که مقادیر تعداد تکرار و جمعیت ذرات به درستی انتخاب شده است.

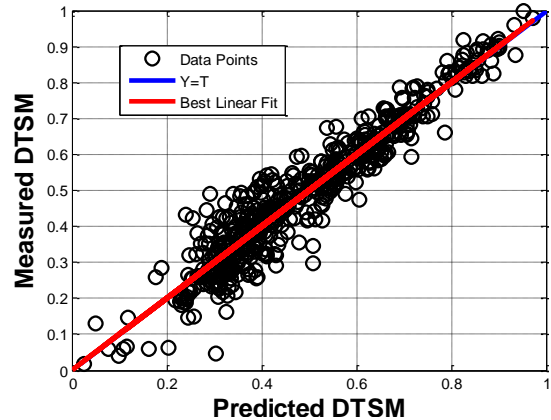


شکل ۴-۵. نرخ کاهش خطا در مرحله آموزش مدل با استفاده از داده‌های (الف): چاه AT-Dt1 و (ب) چاه Az-Dt1

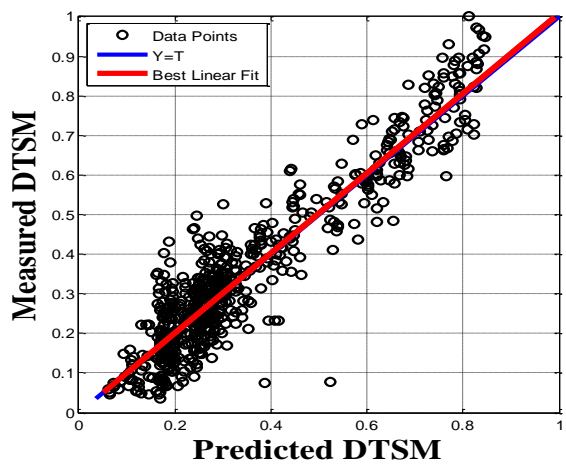
در شکل ۴-۶ نمودار متقاطع کندی موج برشی تخمینی و اندازه‌گیری شده در دو مرحله آموزش و آزمون براساس داده‌های هر چاه نشان داده شده است. در جدول ۴-۵ مقادیر خطا و ضریب تعیین برای هر دو مدل اشاره شده است. تفاوت کم میزان خطا در مرحله آموزش و آزمون هر دو مدل بیانگر قابلیت تعمیم خوب مدل‌های آموزش دیده می‌باشد. لذا در مرحله بعد برای تخمین زمان سیر موج برشی در چاه‌های کربناته (چاه KrA، چاه RSA و RSB) از مدل آموزش دیده با داده‌های چاه AT-Dt1 و برای تخمین کندی موج برشی در چاه ماسه سنگی اهواز (چاه AZA) از مدل آموزش دیده با داده‌های چاه Az-Dt1 استفاده خواهد شد.



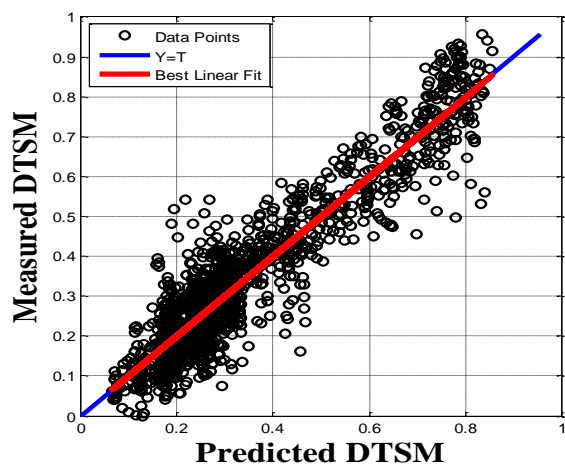
(ب)



(الف)



(د)



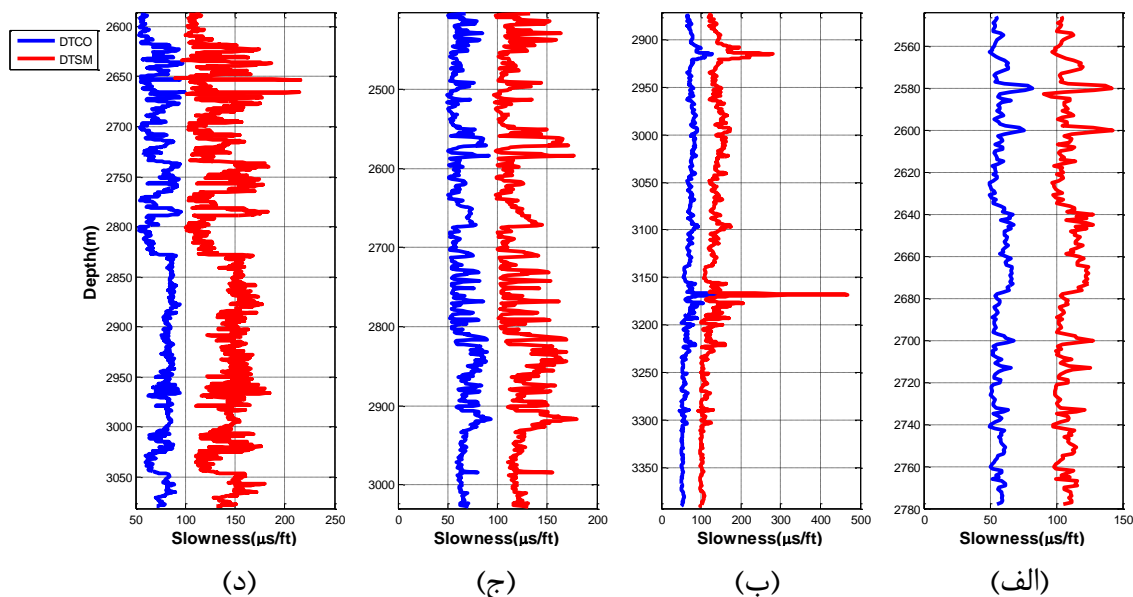
(ج)

شکل ۴-۶. نمودار متقاطع کندی موج برشی تخمینی و اندازه‌گیری شده مرحله آموزش (الف: چاه AT-Dt1 و ج: چاه Az-Dt1) و آزمون (ب: چاه AT-Dt1 و د: چاه Az-Dt1)

جدول ۴-۵. مقادیر خطا و ضریب تعیین مدل‌های آموزش دیده براساس اطلاعات دو چاه

R-Square	RMSE	مرحله	نام چاه
۰/۹۱۶	۰/۰۷۳۳	آموزش	AT-Dt1
۰/۹۰۶	۰/۰۷۳۴	آزمون	
۰/۸۷۰	۰/۰۷۳۳۴	آموزش	Az-Dt1
۰/۸۷۸	۰/۰۷۳۳	آزمون	

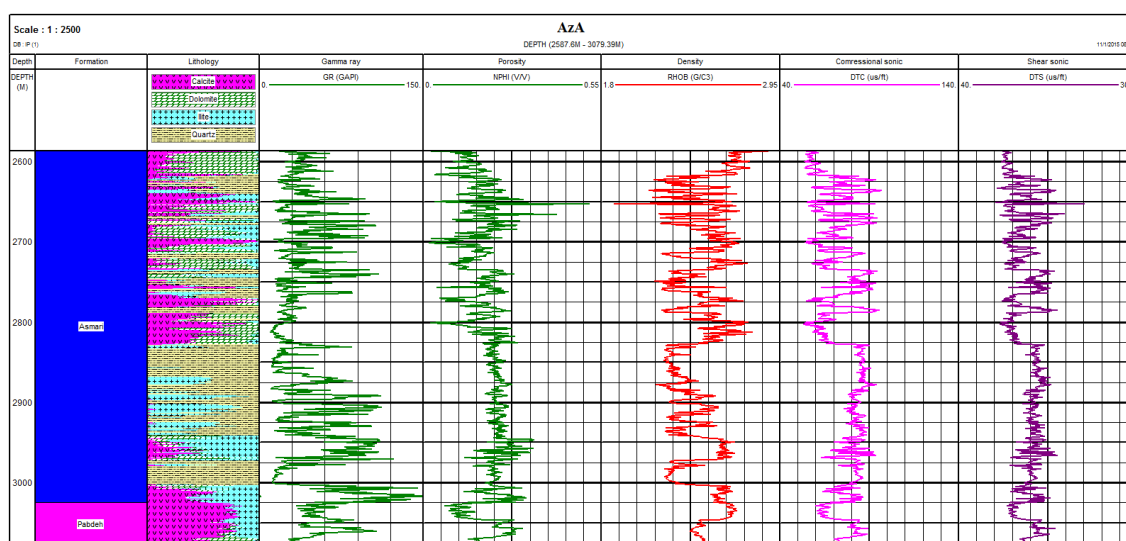
شکل ۴-۷ نمودار کندی موج برشی تخمینی به همراه کندی موج فشاری اندازه‌گیری شده را در چاه-های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود نرخ تغییرات کندی موج برشی در همه چاه‌ها از نرخ تغییرات کندی موج فشاری تبعیت می‌کند.



شکل ۴-۷. نمودار کندی موج برشی تخمینی به همراه کندی موج فشاری در چاه‌های: (الف) RSB، (ب) RSA، (ج) KrA و (د) AZA

۴-۲-۲. نگارهای پتروفیزیکی مورد نیاز

در شکل ۴-۸ نگارهای پتروفیزیکی مورد نیاز برای مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه AZA نشان داده شده است. در این شکل از سمت راست به چپ به ترتیب ستون‌های عمق، سازند، لیتولوژی، نگار گاما، تخلخل، دانسیته، نگار صوتی فشاری و برشی ارائه شده است. نگارهای پتروفیزیکی سایر چاه‌ها در بخش پیوست ارائه شده است (شکل ۹-۱ برای چاه KrA، شکل ۹-۱۴ برای چاه RSA و شکل ۹-۲۷ برای چاه RSB).



شکل ۴-۸. نگارهای پتروفیزیکی مورد استفاده برای مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه AZA

۴-۲-۳. استخراج ضرایب الاستاتیک سنگ

تئوری الاستیسیته شرایطی را توصیف می‌کند که در آن روابط خطی بین تنش وارده و کرنش حاصل از آن وجود دارد. مدول‌های الاستیک سنگ شامل، مدول بالک (K)، مدول برشی (G)، مدول یانگ (E) و ضریب پواسون (ν) می‌باشند که به وسیله انجام آزمایش‌های کشش-فشار (کرنش استاتیکی) روی نمونه‌های سنگی بدست می‌آیند. این مدول‌ها، مدول‌های الاستیک الاستیسیته سنگ نامیده می‌شوند. این مدول‌ها همچنین می‌توانند از روی اندازه سرعت پیشروی موج لرزه‌ای یا صوتی در سنگ نیز بدست آیند (کرنش دینامیکی) که در این حالت، مدول دینامیک الاستیسیته نامیده می‌شوند. به دلیل ملاحظات دامنه کرنش، مدول‌های الاستیک سنگ به طور کلی کمتر از معادل دینامیکی آن می‌باشند (Nauroy, 2011).

برای تعیین خواص الاستیک استاتیک سنگ از نگارهای پتروفیزیکی نیاز است ابتدا خواص دینامیک سنگ محاسبه شود. خواص الاستیک سنگ شامل مدول یانگ، مدول‌های برشی و بالک و ضریب پواسون از سه نگار موج صوتی فشاری و برشی و چگالی بدست می‌آیند (Fjaer et al., 2008). روابط تجربی متعددی برای تبدیل ضرایب دینامیک سنگ به نوع استاتیکی آن برای سنگ‌های متنوع ارائه شده است. لذا مرحله تبدیل پارامترهای دینامیک به استاتیک به لحاظ انتخاب رابطه تجربی متناسب با میدان مورد مطالعه بسیار حائز اهمیت است. روابط تعیین ضرایب الاستیک دینامیکی سنگ در جدول ۴-۶ اشاره شده است.

جدول ۴-۶. روابط تعیین ضرایب الاستیک دینامیکی سنگ (Fjaer et al., 2008; Nauroy, 2011; Zoback, 2007)

شماره رابطه	واحد	تعریف	فرمول
۱۰-۴	پاسکال	$\frac{\text{تنش محوری}}{\text{کرنش محوری}}$	$E_{dyn} = \rho V_s \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right)$
۱۱-۴	پاسکال	$\frac{\text{تنش اعمالی}}{\text{کرنش برشی}}$	$G_{dyn} = \rho V_s^2$
۱۲-۴	پاسکال	$\frac{\text{فشار هیدرواستاتیک}}{\text{کرنش حجمی}}$	$K_{dyn} = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$
۱۳-۴	-	$\frac{\text{کرنش جانبی}}{\text{کرنش محوری}}$	$\nu_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$

برای تعیین روابط مناسب تبدیل ضرایب دینامیک به نوع استاتیک آن، بایستی از نتایج آزمایشگاهی روی تعدادی از نمونه‌ها که از نقاط عمقی مختلف تهیه شده‌اند، استفاده نمود. از طرفی با داشتن

مقادیر ضرایب دینامیک و استاتیک در تعدادی از نقاط می‌توان رابطه مناسب برای میدان مورد مطالعه توسعه داد. روابط تخمین ضرایب الاستیک استاتیکی از نوع دینامیکی متناظر آن براساس آزمایش‌های انجام شده در شرکت مناطق نفتخیز جنوب، برای میدان‌های نفتی و گازی زیر نظر این شرکت در جدول ۷-۴ ارائه شده است.

جدول ۷-۴. روابط تخمین ضرایب الاستیک استاتیکی از نوع دینامیکی متناظر آن

شماره رابطه	واحد	تعریف	فرمول
۱۴-۴	پاسکال	$\frac{\text{تنش محوری}}{\text{کرنش محوری}}$	$E_{sta} = 0.7E_{dyn}$
۱۵-۴	-	$\frac{\text{کرنش جانبی}}{\text{کرنش محوری}}$	$\nu_{sta} = \nu_{dyn}$
۱۶-۴	پاسکال	$\frac{\text{تنش اعمالی}}{\text{کرنش برشی}}$	$G_{sta} = \frac{E_{sta}}{2(1 + \nu_{sta})}$
۱۷-۴	پاسکال	$\frac{\text{فشار هیدرواستاتیک}}{\text{کرنش حجمی}}$	$K_{sta} = \frac{E_{sta}}{3(1 - 2\nu)}$

۴-۲-۴. تخمین مقاومت سنگ

پارامتر مقاومت سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی و ضریب اصطکاک داخلی سنگ می‌باشد. چندین رابطه برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره سنگ از نگارها یا خواص الاستیک براساس مطالعات انجام شده در میداین مختلف ارائه شده است (Chang et al., 2006). برای بدست آوردن نیمرخ پیوسته از مقاومت فشاری تک محوره نیز باید از رابطه تجربی حاصل از نتایج آزمایشگاهی استفاده کرد. براساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در شرکت مناطق نفتخیز جنوب، در چاه‌های مورد مطالعه از رابطه ۱۸-۴ برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوری استفاده می‌شود (Anemangely et al., 2017c).

$$UCS = 2.27E_{sta} + 4.74 \quad 18-4$$

مقاومت کششی سنگ براساس نوع سنگ معمولاً در حدود ۰/۰۸ تا ۰/۱۲ مقاومت فشاری تک محوره آن تغییر می‌کند. براساس آزمایش‌های تک محوری و برزیلی انجام شده در شرکت مناطق نفتخیز جنوب، با توجه به تنوع سنگ‌شناسی در چاه‌های مورد مطالعه، برای تعیین نیمرخ پیوسته از مقاومت کششی سنگ می‌توان از روابط ارائه شده در جدول ۸-۴ استفاده نمود. برای تعیین مقاومت کششی به صورت نیمرخ پیوسته در چاه‌های مورد مطالعه، ابتدا درصد وزنی هر سنگ در تمام نقاط

محدوده مورد مطالعه هر چاه تعیین شد. سپس میانگین وزنی مقاومت کششی در هر نقطه عمقی با توجه به نوع سنگ‌های شناسایی شده محاسبه شد.

جدول ۴-۸. روابط تخمین مقاومت کششی سنگ براساس نوع سنگ و مقاومت تک محوری آن

شماره رابطه	نوع سنگ	رابطه
۱۹-۴	دولومیت	$T_{stre} = 0.08UCS$
۲۰-۴	انهیدریت	$T_{stre} = 0.11UCS$
۲۱-۴	نمک	$T_{stre} = 0.06UCS$
۲۲-۴	سایر سنگ‌ها	$T_{stre} = 0.1UCS$

تلاش‌های کمی برای یافتن رابطه بین زاویه اصطکاک داخلی و خواص ژئوفیزیکی انجام شده است زیرا حتی ضعیف‌ترین سنگ‌ها دارای مقادیر نسبتاً بالای زاویه اصطکاک داخلی می‌باشند و ارتباط نسبتاً پیچیده‌ای بین زاویه اصطکاک داخلی و ویژگی‌های میکرومکانیک سنگ مانند سختی سنگ، که بسیار وابسته به سیمان‌شدگی و تخلخل سنگ است، وجود دارد (Gholami et al., 2014a). با این وجود، برخی شواهد آزمایشگاهی نشان می‌دهند که شیل‌های با ضریب یانگ بالا عموماً دارای زاویه اصطکاک داخلی بالاتری هستند (Lama and Vutukuri, 1978).

از میان روابط مختلف، رابطه ۴-۲۳ ارائه شده توسط پلامب (۱۹۹۴) نشان داد که سازگاری خوبی با میدین زیر نظر شرکت مناطق نفتخیز جنوب برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی سنگ دارد.

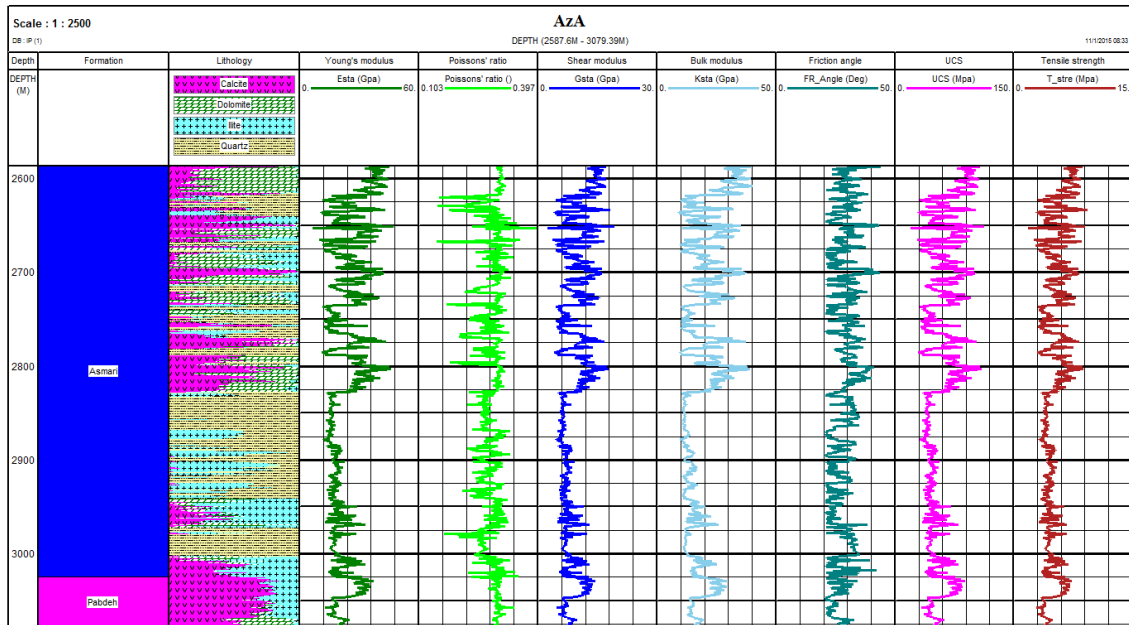
$$\phi = 26.5 - 37.4(1 - NPHI - V_{Shale}) + 62.1(1 - NPHI - V_{Shale})^2 \quad 23-4$$

در این رابطه حجم شیل (V_{Shale}) با استفاده از نگار گاما (GR) و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$V_{Shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad 24-4$$

مقادیر ویژگی‌های استاتیک و مقاومت تخمینی در چاه AZA در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود روند تغییرات ویژگی‌های تخمینی سنگ مطابقت خوبی با لیتولوژی عمق مورد بررسی دارد.

نمودار ویژگی‌های بدست آمده برای سایر چاه‌های مورد مطالعه در بخش پیوست ارائه شده است (شکل ۹-۲ برای چاه KrA، شکل ۹-۵ برای چاه RSA و شکل ۹-۲۸ برای چاه RSB).



شکل ۴-۹. مقادیر ضرایب استاتیک و مقاومت سنگ تخمینی در محدوده عمقی مورد مطالعه در چاه AzA

۴-۲-۵. محاسبات فشار منفذی

فشار منفذی، فشار سیال درون فضای منفذی در سازندهای متخلخل می‌باشد. فشار منفذی یکی از مهم‌ترین پارامترها برای طراحی حفاری و تحلیل‌های ژئومکانیکی و زمین‌شناسی است (Zhang, 2011). فشار منفذی از فشار هیدرواستاتیک تا فشار بیش از اندازه^۱ شدید (۴۸ تا ۹۵ درصد از فشار روباره) تغییر می‌کند (Zhang, 2011). این پارامتر با استفاده از یکی از روابط ایتون، میلر، باورز و مدل تاو از یک سری نگارهای چاه‌پیمایی (شامل نگار مقاومت، سرعت موج صوتی و تخلخل) محاسبه می‌شود و با استفاده از مقادیر بدست آمده از آزمایش درون‌چاهی مانند آزمایش ساقه مته و یا آزمایش مجدد سازند، اصلاح و کالیبره می‌شوند.

به منظور تعیین فشار منفذی در چاه‌های مورد مطالعه، از گرادیان فشار منفذی آب و نفت و فشار منفذی نقطه مبنا استفاده شد. نقطه مبنا در این چاه‌ها سطح تماس گاز-نفت و نفت-آب می‌باشد. اطلاعات مربوط به گرادیان فشار منفذی و فشار منفذی در نقاط مبنای هر چاه در جدول ۴-۹ ارائه شده است. به منظور دستیابی به نتایجی دقیق‌تر در تخمین فشار منفذی نتایج این روش با روش ایتون^۲ تلفیق شد.

¹ Overpressure
² Eaton

جدول ۴-۹. گرادیان فشار منفذی و فشار منفذی نقاط مبنا در هر چاه به تفکیک نوع سیال

نام چاه	عمق (m)	نوع سیال	فشار منفذی (psi)	گرادیان فشار منفذی (psi/ft)
AZA	۲۵۴۸	نفت	۳۳۰۱	۰/۳۹
	۳۰۸۲	آب	۳۹۴۳	۰/۴۹
KrA	۲۳۰۰	نفت	۲۸۰۰	۰/۳
	۳۰۰۰	آب	۳۷۴۰	۰/۴۸۱
RSA	۲۳۱۶	نفت	۳۲۹۶	۰/۳۳
	۲۷۴۳	آب	۳۸۷۴	۰/۴۸۷
RSB	۲۵۴۵	نفت	۳۳۴۲	۰/۳۹
	۲۷۸۰	آب	۳۵۹۵/۸	۰/۴۸۷

۴-۲-۶. تخمین مقاومت فشاری محصور شده

رابطه ۴-۲۵ یکی از روش‌های پذیرفته شده مکانیک سنگی است که به صورت گسترده برای محاسبه مقاومت فشاری محدوده شده^۱ سنگ استفاده شده است (Caicedo et al., 2005; Shi et al., 2015). در چاه‌های مورد مطالعه از این رابطه برای تخمین مقاومت فشاری محصور شده استفاده شد.

$$CCS_{D_P} = UCS + D_P + 2D_P \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad 25-4$$

اختلاف فشار ته چاه (D_P) در این رابطه با استفاده از فشار حاصل از چگالی معادل در جریان ($ECD_{Pressure}$) و فشار منفذی (P_P) تعیین می‌شود.

$$D_P = ECD_{Pressure} - P_P \quad 26-4$$

در صورتی که سنگ نفوذناپذیر و چاه قائم باشد برای محاسبه مقاومت فشاری محصور شده از رابطه توسعه داده شده توسط اسکمپتون (Skempton, 1984) استفاده می‌شود (Calhoun and Ewy, 2009).

$$CCS_{SK} = UCS + D_{P_{SK}} + 2D_{P_{SK}} \frac{\sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad 27-4$$

در این رابطه اختلاف فشار ته چاه با استفاده از رابطه ۴-۲۸ محاسبه می‌شود.

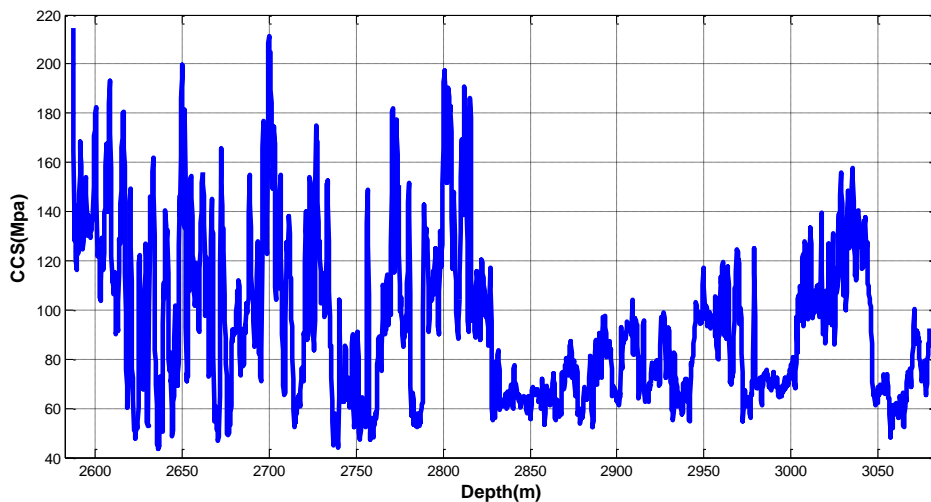
$$D_{P_{SK}} = ECD_{Pressure} - \left(P_P - \frac{OB - ECD_{Pressure}}{3} \right) \quad 28-4$$

¹ Confined Compressive Strength (CCS)

به منظور تعیین مناسب تخمین مقاومت فشاری محصور شده سنگ، بایستی براساس مقدار تخلخل موثر سنگ (PHIE) رابطه مناسب برای اختلاف فشار ته چاه انتخاب شود. بدین منظور از جدول ۴-۱۰ استفاده شد. در شکل ۴-۱۰ مقادیر مقاومت فشاری محصور شده تخمینی برای چاه AZA با استفاده از روابط ارائه شده نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۰. نحوه انتخاب رابطه مناسب برای تخمین اختلاف فشار ته چاه براساس تخلخل موثر (Caicedo et al., 2005; Calhoun and Ewy, 2009)

رابطه	شرایط
$CCS = CCS_{DP}$	اگر تخلخل موثر بیشتر از ۰/۲ باشد
$CCS = CCS_{DP} \frac{(PHIE - 0.05)}{0.15} + CCS_{SK} \frac{(0.20 - PHIE)}{0.15}$	اگر تخلخل موثر بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ باشد
$CCS = CCS_{SK}$	اگر تخلخل کمتر از ۰/۰۵ باشد



شکل ۴-۱۰. مقادیر مقاومت فشاری محصور شده تخمینی برای چاه AZA

۴-۲-۷. تخمین مقادیر تنش‌ها

قبل از انجام حفاری و با فرض اینکه هیچگونه فعالیت لرزه‌ای وجود ندارد، سازندهای سنگی در حالت تعادل تنشی (حالت استاتیک) هستند و حرکت آن‌ها یا بسیار ناچیز و یا حرکتی ندارند. سه تنش اصلی در این حالت را تنش‌های برجا می‌نامند. در زمان حفاری، تنش استاتیک نامتعادل می‌شود و این امر موجب ناپایداری در سازندهای سنگی می‌شود. این تنش‌های برجای نامتعادل، مجموعه تنش‌های متفاوتی را در ناحیه حفاری ایجاد می‌نماید که تنش‌های القایی نامیده می‌شوند. اولین گام در بررسی ناپایداری دیواره چاه و تعیین پنجره ایمن وزن گل، تعیین تنش‌ها در حالت استاتیک است؛ بنابراین، در ادامه به تخمین تنش‌های برجا و سپس تنش‌های القایی در دیواره چاه‌های مورد مطالعه پرداخته خواهد شد.

۴-۲-۷-۱. تعیین تنش‌های برجا

با فرض اینکه، امتداد عمودی، یکی از مؤلفه‌های اصلی تنش باشد (تنش قائم)؛ دو مؤلفه اصلی دیگر به صورت افقی خواهند بود (تنش افقی بیشینه و کمینه). تنش قائم (σ_v) با جمع مقادیر چگالی سنگ‌ها (ρ) از سطح زمین تا عمق (z) مورد نظر بدست می‌آید (رابطه ۴-۲۹).

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z)gz \cong \bar{\rho}gz \quad ۲۹-۴$$

در این رابطه g شتاب گرانش و $\bar{\rho}$ چگالی متوسط سنگ از سطح زمین تا عمق مورد نظر است. البته این رابطه برای چاه‌های حفر شده در خشکی^۱ است و در چاه‌های حفر شده در مناطق دریایی^۲ بایستی وزن آب را نیز به آن اضافه نمود. اما استفاده از این رابطه نیازمند وجود مقادیر چگالی برای لایه‌های سنگی بالای بازه عمقی مورد مطالعه است. اندازه‌گیری تنش‌های برجا در سرتاسر جهان نشان داده است که تنش عمودی و عمق رابطه خطی با هم دارند (Peng and Zhang, 2007). لذا برای اعماق بالای محدوده مورد نظر از رابطه ۴-۳۰ استفاده خواهد شد. در این رابطه تنش عمودی برحسب مگاپاسکل و عمق برحسب متر است.

$$\sigma_v = 0.027z \quad ۳۰-۴$$

مقدار تنش افقی کمینه (σ_h) را می‌توان از روش‌های مختلفی مانند آزمایش نشت^۳، شکست هیدرولیکی^۴، آزمایش شکافتگی کوچک^۵ و بزرگ^۶ به صورت مستقیم اندازه‌گیری کرد (Abdideh and Fathabadi, 2013). اما تا کنون روشی برای اندازه‌گیری تنش افقی بیشینه (σ_H) وجود ندارد (Nauroy, 2011). روش غیرمستقیم اندازه‌گیری مقادیر تنش افقی بر پایه مبانی الاستیسیته منفذی استوار است. در میادینی که از نظر تکتونیکی فعال‌اند؛ تنش‌ها و کرنش‌ها از حرکات صفحات تکتونیکی ناشی می‌شود. اگر کرنش‌های تکتونیکی بر سازند سنگی اعمال گردد، این کرنش‌ها یک مؤلفه تنش در سنگ الاستیک اضافه می‌نماید. مدل پوروالاستیک کرنش افقی، از کرنش‌های تکتونیکی استفاده نموده و تنش‌های افقی را محاسبه می‌نمایند (Blanton and Olson, 1997). در

¹ On shore

² Off shore

³ Leak Off Test (LOT)

⁴ Hydraulic fracturing

⁵ Mini-fracture test

⁶ Micro-fracture test

این مطالعه، از روابط مدل پوروالاستیسیته کرنش افقی برای تخمین تنش‌های افقی بیشینه و کمینه استفاده شد (روابط ۴-۳۱ و ۴-۳۲).

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha p_p + \alpha p_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_x + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_y \quad ۳۱-۴$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_v - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha p_p + \alpha p_p + \frac{E}{1-\nu^2} \varepsilon_y + \frac{\nu E}{1-\nu^2} \varepsilon_x \quad ۳۲-۴$$

در این روابط، ν ضریب پواسون، α ضریب بایوت، E مدول یانگ، p_p فشار منفذی و ε_x و ε_y به ترتیب کرنش متناظر با تنش افقی حداقل و حداکثر است.

۴-۷-۲-۴. تعیین تنش‌های القایی

عملیات حفاری، شرایط تعادل تنش‌های برجا را برهم می‌زند؛ بنابراین، تنش‌های القایی جدیدی در اطراف دیواره چاه ایجاد می‌کند. اگر دیواره چاه از تنش‌های القایی تأثیر پذیرد، موجب شکستگی در سنگ دیواره خواهد شد؛ از اینرو، بعد از تخمین تنش‌های اصلی، با استفاده از آن‌ها تنش‌های القایی تعیین می‌شود. با فرض شرایط همسانگرد در محیط الاستیک، تنش متمرکز اطراف دیواره چاه قائم با استفاده از روابط توسعه داده شده توسط کرش (Kirsch, 1898) محاسبه می‌شود برای محاسبه تنش‌های القایی در هر نقطه از چاه کرش روابط زیر را تعریف کرد.

$$\sigma_r = \frac{1}{2} (\sigma_H + \sigma_h) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \frac{a^2}{r^2} P_w \quad ۳۳-۴$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} (\sigma_h + \sigma_H) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{1}{2} (\sigma_H - \sigma_h) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - \frac{a^2}{r^2} P_w \quad ۳۴-۴$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta \quad ۳۵-۴$$

که در آن θ زاویه با امتداد تنش افقی حداکثر، σ_θ تنش مماسی، σ_r تنش شعاعی، P_p فشار منفذی، r فاصله از مرکز چاه و a شعاع چاه است. در دیواره چاه ($r = a$) روابط کرش به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$\sigma_r = P_w \quad ۳۶-۴$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) - P_w \quad ۳۷-۴$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta \quad ۳۸-۴$$

۴-۲-۸. تعیین پنجره ایمن وزن گل

سازندها در عمق مشخص، تحت تنش‌های فشاری عمودی و افقی و همچنین فشار منفذی قرار دارند. زمانی که چاه حفاری می‌شود سنگ‌های دربرگیرنده بایستی باری را که به وسیله سنگ‌های برداشته شده حمل می‌شده است را حمل نمایند. در سنگ‌هایی که رفتار الاستیک دارند این پدیده منجر به تمرکز تنش در اطراف چاه می‌شود. اگر این حفاری در سنگ‌های ضعیف انجام شود این تمرکز تنش منجر به شکست در دیواره چاه می‌شود.

به منظوره پیشگیری از جریان سیال به داخل چاه و یا شکست سنگ، چاه با گل حفاری می‌شود. فشار گل اصولاً به منظور جلوگیری از جریان سیال سازندی به داخل چاه است. انتخاب وزن گل مناسب نقش مهمی در فرآیند حفاری دارد. در صورتی که فشار گل از مقدار مناسب خود کاهش یابد منجر به ریزش دیواره چاه بر اثر شکست فشاری و در نهایت منجر به نفوذ سیال سازندی به داخل چاه خواهد شد. از طرفی افزایش فشار گل منجر به شکست کششی در سنگ و هرزروی گل حفاری خواهد شد.

شکست فشاری به دو حالت در دیواره چاه نمایان می‌شود: (۱) افزایش قطر چاه در نتیجه شکست ترد: این پدیده در سنگ‌های ترد رخ می‌دهد و بر روی نگارهای برداشت شده تأثیر گذاشته و مشکلاتی در فرآیند سیمان دیواره چاه ایجاد می‌کند (Fjaer et al., 2008). اما بایستی اذعان نمود که افزایش قطر چاه همیشه ناشی از شکست ترد نیست و می‌تواند بر اثر خوردگی هیدرولیکی و یا مکانیکی نیز ایجاد شود. (۲) کاهش قطر چاه: که عموماً در شیل‌های ضعیف (حالت پلاستیکی)، ماسه سنگ و نمک رخ می‌دهد و ممکن است بعضی سازندهای گچی نیز این رفتار را نشان دهند (Fjaer et al., 2008).

با توجه به اهمیت تعیین وزن بهینه گل، ابتدا با استفاده از روابط ارائه شده در بخش ۴-۲-۶ تنش‌ها در اطراف چاه محاسبه می‌شوند. سپس با مقایسه نتایج بدست آمده با معیار شکست مناسب حداقل وزن گل مورد نیاز به منظور پیشگیری از شکست فشاری سنگ تعیین می‌شود. به طور کلی معیارهای شکست، حداکثر وزن گل مورد نیاز را به درستی تعیین نمی‌کنند و تخمین بالاتری ارائه می‌دهند. این امر از آن‌جا ناشی می‌شود که همه معیارهای شکست بر مبنای برش سنگ (در حالت فشار) ارائه شده‌اند.

انتخاب معیار شکست مناسب برای تحلیل پایداری دیواره چاه مشکل و بحث‌انگیز است (Al-Ajmi and Zimmerman, 2009; Rahimi, 2014) تاکنون معیارهای شکست و مدل‌های رفتاری متعددی برای پایداری دیواره چاه ارائه و به کار برده شده‌اند. در این میان معیارهای شکست سه بعدی از دقت

بهتری نسبت به معیارهای شکست دو بعدی برخوردار هستند (Al-ajmi, 2006) اما معیارهای شکست دو بعدی به دلیل سادگی کاربرد وسیع‌تری داشته‌اند. بایستی این نکته را مد نظر قرار داد که همه معیارهای شکست مبتنی بر تنش موثر هستند که به صورت تنش منهای حاصل ضرب ضریب بایوت و فشار منفذی می‌باشد. در این بخش از دو معیار شکست موهر-کلمب (Mohr, 1900) و هوک-براون (Hoek and Brown, 1980) برای تعیین پنجره ایمن وزن گل و در نهایت به منظور کالیبره کردن مدل استفاده خواهد شد. وجه مشترک این دو معیار عدم لحاظ تنش اصلی متوسط روی شکست سنگ است. در ادامه این دو معیار به صورت مختصر تشریح خواهد شد.

۴-۲-۱- معیار شکست موهر-کلمب

پوش خطی ساده معیار شکست موهر معمولاً به عنوان معیار شکست موهر-کلمب شناخته شده است. معیار شکست موهر-کلمب یکی از پرکاربردترین معیارها در تحلیل پایداری چاه است (McLean and Addis, 1990) و بررسی مطالعات انجام شده در مکانیک سنگ و پایداری چاه تایید کننده این مطلب می‌باشد که این معیار به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Soliman and Dusterhoft, 2016). در این معیار شکست برشی در امتداد صفحه‌ای رخ می‌دهد که تنش نرمال (σ_n) و تنش برشی (τ) در آن صفحه از رابطه زیر پیروی کند (Mohr, 1900):

$$\tau = c + \mu\sigma_n \quad ۳۹-۴$$

در این رابطه، c چسبندگی و μ ضریب اصطکاک داخلی ماده می‌باشد.

شکل خطی معیار شکست موهر را براساس فضای تنش‌های اصلی می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_1 = \sigma_c + N\sigma_3 \quad ۴۰-۴$$

$$N = [(\mu^2 + 1)^{0.5} + \mu]^2 = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad ۴۱-۴$$

که در آن، σ_1 و σ_3 به ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین تنش اصلی موثر در شکست، σ_c مقاومت فشاری تک محوره و ϕ زاویه اصطکاک داخلی معادل تانژانت معکوس μ می‌باشد.

در جدول ۴-۱۱ خلاصه روابط مورد نیاز به منظور تعیین حداقل وزن گل مورد نیاز به منظور پیشگیری از شکست برشی سنگ با استفاده از معیار موهر-کلمب اشاره شده است. یکی از روابط براساس شرایط تنش‌های القایی دیواره چاه در هر نقطه عمقی انتخاب می‌شود.

جدول ۴-۱۱. روابط تعیین مقدار حداقل فشار گل مورد نیاز براساس معیار موهر-کلمب (Al-Ajmi, 2006)

مقدار حداقل فشار گل مورد نیاز	حالت‌های مختلف تنش‌های الفایی
$P_{W(BO)} = \frac{E - \sigma_c}{N}$	$\sigma_r \leq \sigma_\theta \leq \sigma_z$
$P_{W(BO)} = \frac{D - \sigma_c}{1 + N}$	$\sigma_r \leq \sigma_z \leq \sigma_\theta$
$P_{W(BO)} = D - \sigma_c - NE$	$\sigma_z \leq \sigma_r \leq \sigma_\theta$
$N = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right), E = \sigma_V + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), D = 3\sigma_H - \sigma_h$	

با توجه به ناکارآمدی معیار شکست موهر-کلمب در تعیین حد بالای فشار گل در حالت شکست کششی، از رابطه زیر برای تعیین این مقدار استفاده خواهد شد (Al-Ajmi, 2006; Gholami et al., 2014a).

$$P_{W(Frac)} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_0 - T \quad ۴۲-۴$$

۴-۲-۱-۲. معیار شکست هوک-برآون

معیار شکست هوک و براون برای پیش‌بینی مقاومت نهایی سنگ بکر و ماده سنگ توسعه داده شده است. از زمان ارائه این معیار در سال ۱۹۸۰، در چند مرحله مورد اصلاح قرار گرفت (Hoek, 1988; Hoek et al., 2002, 1992, Hoek and Brown, 1997, 1980). این معیار تجربی از مقاومت فشاری تک محوره به عنوان پارامتر مقیاس استفاده می‌کند و دو پارامتر بدون بعد m و s را ارائه می‌دهد. هوک و براون بعد از مطالعه گسترده روی داده‌های آزمایشگاهی، رابطه بین بیشترین و کمترین مقادیر تنش‌ها را در نقطه شکست به صورت زیر بیان نمودند.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{\frac{1}{2}} \quad ۴۳-۴$$

در این رابطه m و s ثابت‌های وابسته به خواص و نوع سنگ و σ_c مقاومت فشاری تک محوره سنگ است. مقادیر مختلف پارامتر m در جدول ۴-۱۲ ارائه شده است.

جدول ۴-۱۲. مقادیر پارامتر m برای انواع سنگ‌ها (Hoek and Brown, 1997)

نوع سنگ	مقدار پارامتر m
سنگ‌های کربناته با سطوح کلیواژ خوب توسعه یافته (مانند دولومیت، سنگ آهک و مرمر)	۵ تا ۸
سنگ‌های رسی (مانند گل سنگ، شیل، اسلیت و لای سنگ)	۴ تا ۱۰
سنگ‌های ماسه‌ای کریستاله خیلی خوب و سطوح کریستالی کلیواژ ضعیف (مانند ماسه سنگ و کوارتزیت)	۱۵ تا ۲۴
سنگ‌های آذرین کریستاله دانه ریز با چند نوع کانی (مانند آندزیت، دولریت، دیاباز و ریولیت)	۱۶ تا ۱۹
سنگ‌های دگرگونی و آذرین دانه درشت با چند نوع کانی (مانند آمفیبولیت، گابرو، گنیس، گرانیت، نوریت و کوارتز دوریت)	۲۲ تا ۳۳

در جدول ۴-۱۳ خلاصه روابط مورد نیاز برای محاسبه حداقل فشار گل ($P_{W(Bo)}$) ارائه شده است. برای انتخاب رابطه مناسب از این جدول بایستی مقادیر بیشینه تنش‌های مماسی، محوری و شعاعی با یکدیگر مقایسه شوند.

جدول ۴-۱۳. روابط تعیین مقدار حداقل فشار گل مورد نیاز براساس معیار هوک-براون (Gholami et al., 2014b)

مقدار حداقل فشار گل مورد نیاز	حالت‌های مختلف تنش‌های القایی
$P_{W(Bo)} = \frac{(2D + p) - \sqrt{(2E + p)^2 - 4E^2 + q}}{2}$	$\sigma_r \leq \sigma_\theta \leq \sigma_z$
$P_{W(Bo)} = \frac{(4D + p) - \sqrt{(4D + p)^2 + 16q - 16D^2}}{8}$	$\sigma_r \leq \sigma_z \leq \sigma_\theta$
$P_{W(Bo)} = \frac{2(D - E) - \sqrt{4(D - E)^2 - 4(D - E - pE - q)}}{2}$	$\sigma_z \leq \sigma_r \leq \sigma_\theta$
$q = \sigma_c^2, p = m\sigma_c, E = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h), D = 3\sigma_H - \sigma_h$	

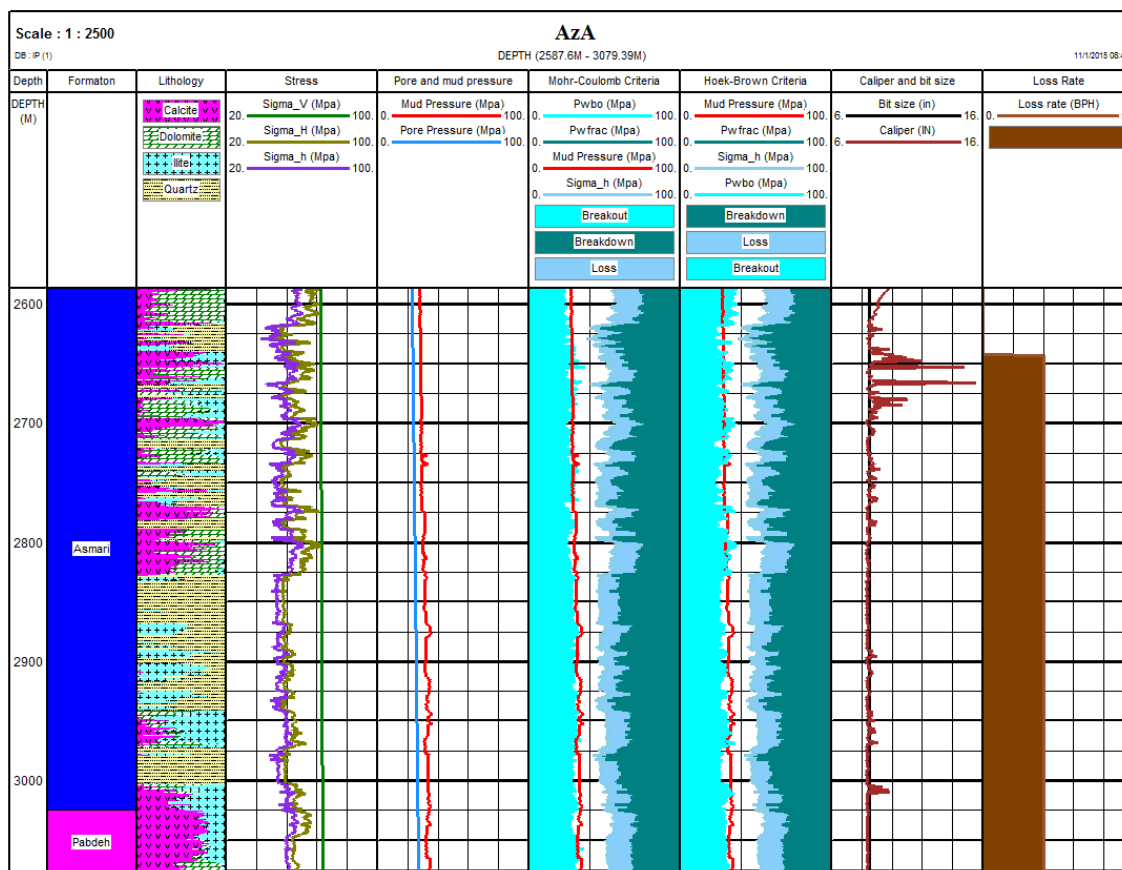
با توجه به عدم توانایی معیار هوک-براون در تعیین حداکثر مقدار مناسب فشار گل، از ارائه روابط این بخش صرف نظر می‌شود. برای تعیین این مقدار از رابطه ۴-۴۲ استفاده خواهد شد (Al-ajmi, 2006)

۴-۲-۹. نتایج معیارهای شکست

در شکل ۴-۱۱ نتایج حاصل از اعمال دو معیار شکست موهر-کلمب و هوک-براون نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود هر دو معیار مناطق عمقی دارای ریزش دیواره چاه را به صورت مطلوبی نشان می‌دهند. البته معیار هوک-براون در این زمینه نسبت به معیار موهر-کلمب بهتر عمل کرده است. معیار موهر-کلمب در تخمین حداقل فشار لازم به منظور جلوگیری از شکست برشی محافظه‌کارانه عمل کرده و این مقادیر را بیش‌برآورد کرده است. بررسی هدرروی سیال حفاری

(ستون آخر شکل ۴-۱۱) در چاه نشان می‌دهد که از عمق ۲۶۵۰ متر به پایین نشت سیال حفاری به داخل سازند وجود دارد، اما هر دو معیار، وجود شکستگی کششی در دیواره چاه را نشان نمی‌دهند. برای تحلیل بیشتر، نگارهای تصویری برداشت شده از چاه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که چند شکستگی باز طبیعی در عمق ۲۶۵۰ متر به بعد وجود دارد و از آنجایی که فشار سیال حفاری در این محدوده عمقی بیشتر از فشار سازندی است؛ بنابراین، هدرروی ناشی از این شکستگی‌ها باز طبیعی بوده است.

پنجره ایمن وزن گل بدست آمده برای سایر چاه‌های مورد مطالعه در بخش پیوست ارائه شده است (شکل ۳-۹ برای چاه KfA، شکل ۹-۱۶ برای چاه RSA و شکل ۹-۲۹ برای چاه RSB). تحلیل‌های انجام شده در این بخش بر روی سایر چاه‌ها نیز انجام گردید.



شکل ۴-۱۱. پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده براساس دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون برای چاه AZA

۴-۳. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل به منظور استخراج ویژگی‌های ژئومکانیکی مخازن در چاه‌های مورد مطالعه، مدل‌سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه انجام شد. ابتدا ویژگی‌های دینامیکی در چاه‌های مورد مطالعه استخراج

شد و سپس از روابط توسعه داده شده بین پارامترهای دینامیکی و استاتیکی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی روی مغزه‌های سنگ، ضرایب استاتیک و مقاومتی سنگ محاسبه شد. در ادامه فشار منفذی و تنش‌های برجا به منظور تعیین پنجره ایمن وزن گل تخمین زده شدند. برای تعیین محدوده ایمن گل از دو معیار شکست موهر-کلمب و هوک-براون استفاده شد.

مقایسه نتایج حاصل از معیار موهر-کلمب و هوک براون با مشاهدات درون چاهی بدست آمده از نگار کلیپر نشان داد که هر دو معیار مناطق دارای شکست برشی در دیواره چاه را به نحو مطلوبی مشخص نموده‌اند. اما هیچ یک از این معیارهای شکست نتوانستند به درستی نواحی دارای هدر روی سیال حفاری را تعیین نمایند. از اینرو؛ نگارهای تصویری برای نوع شکستگی‌های دیواره چاه مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این تحلیل نشان داد که علت هدرروی وجود شکستگی‌های باز طبیعی در دیواره چاه است. این تحلیل‌ها برای سایر چاه‌های مورد مطالعه نیز انجام شد که شکل‌های مربوط به آن در بخش پیوست آورده شده است.

فصل پنجم: پیش پردازش داده‌ها و تشکیل بانک اطلاعاتی

۵-۱. مقدمه

پیش‌پردازش داده یک تکنیک داده‌کاوی است که داده‌های خام را به فرمی قابل فهم انتقال می‌دهد. داده‌های ورودی بایستی به لحاظ مقدار، ساختار و قالب به گونه‌ای فراهم شوند که بتوان به خوبی روش‌های داده‌کاوی را روی آن‌ها پیاده نمود (García et al., 2015). متأسفانه، داده‌های برداشت شده در دنیای واقعی دارای عوامل منفی مانند وجود نوفه، ناپیوستگی و داده‌های گم‌شده می‌باشند؛ بنابراین، استفاده از این داده‌ها به دلیل کیفیت پایین، منجر به عملکرد نامناسب مدل تخمین‌گر و نتایج ضعیف و دور از واقعیت خواهد شد.

روش‌های پیش‌پردازش داده شامل پاک‌سازی داده، تجمیع داده، نگاشت داده و کاهش ابعاد داده می‌باشند. پاک‌سازی داده می‌تواند برای کاهش نوفه و تصحیح ناپیوستگی داده‌ها اعمال شود. تجمیع داده، داده‌های حاصل از منابع مختلف را به صورت یک داده منسجم ادغام می‌کند. فرآیند نرمالیزه کردن به معنی نگاشت داده می‌باشد؛ که برای همسان‌سازی مقیاس داده‌ها در مرحله انتخاب ویژگی و یا به منظور افزایش دقت و کارایی الگوریتم‌های داده‌کاوی، استفاده می‌شود. کاهش ابعاد داده می‌تواند اندازه داده را به وسیله انتخاب ویژگی یا خوشه‌بندی کاهش دهد. این روش‌ها دو به دو ناسازگار^۱ نیستند و می‌توانند با هم استفاده شوند (Chakrabarti et al., 2008).

در این فصل، ابتدا داده‌های جمع‌آوری شده تجمیع خواهند شد. بدین منظور از روش بزرگ‌نمایی مقیاس داده‌ها استفاده خواهد شد. سپس بانک اطلاعاتی مختلف از ترکیب انواع منابع داده‌ها تشکیل خواهد شد. در ادامه برای ارزیابی هم‌خطی داده‌ها از روش‌های ارزیابی ماتریس همبستگی و برای حذف اثر هم‌خطی از روش‌های حذف پارامتر، تحلیل مؤلفه اصلی^۲ و تحلیل مؤلفه مستقل^۳ استفاده خواهد شد.

۵-۲. همسان‌سازی مقیاس داده‌ها

داده‌های اصلی این مطالعه شامل نگارهای پتروفیزیکی، پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بدست آمده از نگارهای پتروفیزیکی (در فصل مدل‌سازی یک بعدی) و نگارهای گل‌نگاری می‌باشند. یکی از مشکلات اصلی تجمیع این داده‌ها، غیر همسان بودن مقیاس داده‌ها در چاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. منظور از

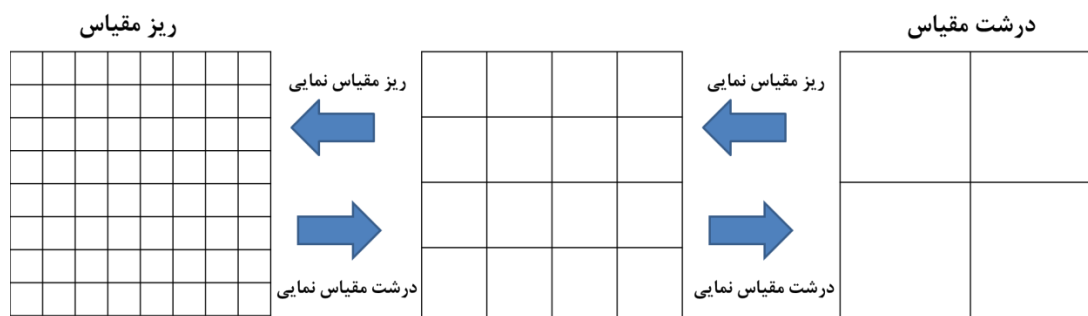
¹ Mutually exclusive

² Principle Component Analysis (PCA)

³ Independent Component Analysis (ICA)

مقیاس در اینجا، فواصل اندازه‌گیری یک ویژگی در طول چاه می‌باشد. برای نمونه مقیاس اندازه‌گیری نگارهای پتروفیزیکی در چاه‌های مورد مطالعه حدود ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد.

مقیاس‌سازی^۱ روی این موضوع تمرکز دارد که چه اتفاقی روی ویژگی‌های یک شیء می‌افتد زمانی که مقیاس (اندازه یا بعد) آن تغییر می‌کند (Howard, 2005). دو روش درشت‌مقیاس‌نمایی^۲ و ریزمقیاس‌نمایی^۳ برای مقیاس‌سازی وجود دارد. در شکل ۵-۱ مفاهیم درشت‌مقیاس‌نمایی و ریزمقیاس‌نمایی نشان داده شده است.



شکل ۵-۱. تصویری از ریزمقیاس‌نمایی و درشت‌مقیاس‌نمایی

عموماً مقیاس داده‌های عملیاتی بزرگتر از نگارهای پتروفیزیک می‌باشد. در چاه‌های مورد مطالعه این مقیاس برای دو چاه ۱ متر می‌باشد. در صورت ریزمقیاس‌سازی (یعنی تبدیل مقیاس ۱ متر داده‌های عملیاتی به مقیاس ۰/۱۵ متری) در این چاه‌ها فقط دو نقطه داده در هر یک متر برای هر ویژگی وجود دارد که بایستی برای بدست آوردن مقادیر ۵ تا ۶ نقطه داده متناظر با داده پتروفیزیک در فاصله یک متری استفاده شود؛ بنابراین، مقادیر بدست آمده برای هر ویژگی با روش ریزمقیاس‌نمایی بسیار دور از واقعیت خواهد بود؛ چرا که با تعداد نقاط بسیار کم (یعنی ۲ نقطه) تعداد نقاط بیشتر (یعنی ۵ الی ۶ نقطه) را بایستی تخمین زد؛ از اینرو، از روش درشت‌مقیاس‌نمایی برای تبدیل مقیاس نگارهای پتروفیزیک به مقیاس داده‌های عملیاتی استفاده خواهد شد. در جدول ۵-۱ مقیاس داده‌ها و روش درشت‌مقیاس‌نمایی در هر چاه اشاره شده است. روش میانگین‌گیری یکی از پرکاربردترین و ساده‌ترین روش‌ها برای افزایش مقیاس داده‌ها می‌باشد (Farmer, 2002; Nielsen and Tveito, 1998; Tiwary et al., 2009)؛ بنابراین، از این روش برای افزایش مقیاس نگارهای پتروفیزیکی و خواص سنگ در دو چاه KrA و RSB استفاده خواهد شد. در دو چاه دیگر، با توجه به اینکه مقیاس ۰/۲ متر بسیار نزدیک به ۰/۱۵۲۴ متر می‌باشد؛ لذا، از روش عکس مجذور فاصله برای درشت‌نمایی مقیاس

¹ Scaling

² Upscaling

³ Downscaling

۰/۱۵۲۴ به ۰/۲ استفاده شد. در ادامه هر یک از روش‌های درشت‌نمایی مقیاس داده‌ها به اختصار شرح داده خواهد شد.

جدول ۱-۵. مقیاس ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در هر چاه و روش هم‌مقیاس‌سازی

نام چاه	مقیاس نگارهای پتروفیزیک (متر)	مقیاس پارامترهای عملیاتی (متر)	مقیاس درشت‌نمایی (متر)	روش درشت‌نمایی - نمایی
AzA	۰/۱۵۲۴	۰/۲	۰/۲	عکس مجذور فاصله
KrA	۰/۱۵۲۴	۱	۱	میانگین‌گیری
RSA	۰/۱۵۲۴	۰/۲	۰/۲	عکس مجذور فاصله
RSB	۰/۱۵۲۴	۱	۱	میانگین‌گیری

۱-۲-۵. روش عکس مجذور فاصله

عکس مجذور فاصله یکی از ساده‌ترین و محبوب‌ترین روش‌های درونیایی است. این روش مفهوم نزدیکی را با تغییر تدریجی سطح روند^۱ ترکیب می‌کند (Babak and Deutsch, 2009). یک درونیاب فاصله معکوس وزنی، به عنوان میانگین وزنی مقادیر نمونه‌ها در فضای همسایگی تعریف می‌شود (Diodato and Ceccarelli, 2005). برای محاسبه مقدار یک ویژگی در مکان u از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$Z^*(u) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i) \quad 1-5$$

در این رابطه، u_i مکان نمونه‌های موجود در فضای جستجو، Z^* مقدار ویژگی در مکان تخمین، n تعداد نقاط نمونه، λ_i وزن تخصیص داده شده به هر نقطه نمونه و $Z(u_i)$ مقادیر ویژگی در نقاط نمونه می‌باشند. وزن تخصیص داده شده به هر نقطه نمونه با استفاده از فاصله اقلیدسی بین مکان تخمین و نقطه نمونه (d) از رابطه ۲-۵ محاسبه می‌شود.

$$\lambda_i = \frac{\frac{1}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2}\right)}, \quad (i=1, \dots, n) \quad 2-5$$

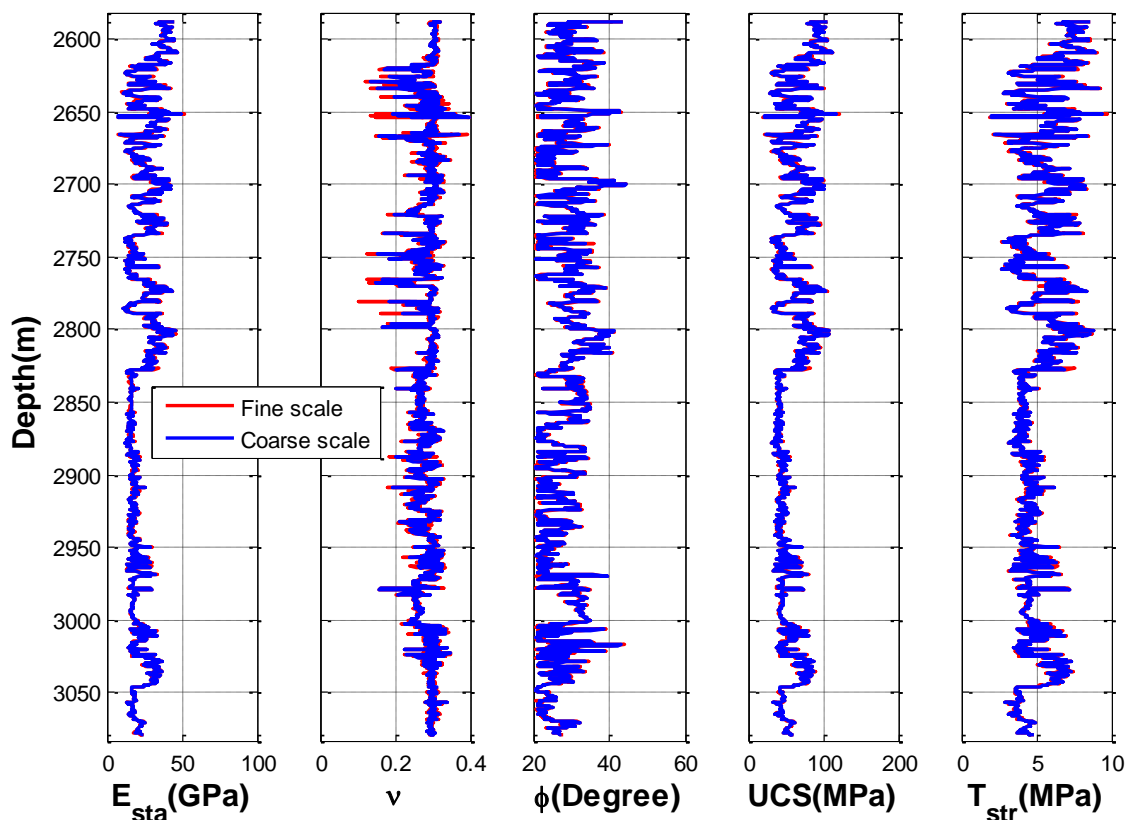
در جدول ۲-۵ شبه کد مورد استفاده برای دستیابی به قدرت تفکیک ۰/۲ متر در داده‌های نگارهای چاه‌پیمایی و ویژگی‌های ژئومکانیکی ارائه شده است.

¹ Trend surface

جدول ۲-۵. شبه کد نوشته شده در نرم افزار MATLAB به منظور دستیابی به قدرت تفکیک ۰/۲ متر برای نگارهای چاه پیمایی (یا خواص سنگ)

۱- بردار عمق مربوط به داده‌های گل نگاری را فراخوانی کن (MudDepth).
۲- بردار عمق مربوط به داده‌های چاه پیمایی (یا خواص سنگ) را فراخوانی کن (PetDepth).
۳- طول بردار MudDepth را مشخص کن (n).
۴- بردار اولیه a_UPS را با طول n و مقادیر برابر صفر ایجاد کن.
۵- برای هر i از ۱ تا n
۱-۵- مقدار MudDepth(i) را فراخوانی کن.
۲-۵- بزرگترین مقدار کمتر از MudDepth(i) را از بردار PetDepth مشخص کن (Min).
۳-۵- کوچکترین مقدار بزرگتر از MudDepth(i) را از بردار PetDepth مشخص کن (Max).
۴-۵- با استفاده از مقادیر Min، Max و مقدار MudDepth(i) وزن‌های تخصیص داده شده را محاسبه کن (رابطه ۲-۵).
۵-۵- مقادیر متناظر با اندیس Min و Max را از بردار نگار پتروفیزیکی (یا خواص سنگ) فراخوانی کن.
۶-۵- مقدار $a_UPS(i)$ را با استفاده از مقادیر محاسبه شده در مراحل ۴-۵ و ۵-۵، و با استفاده از رابطه ۱-۵ محاسبه کن.

برای نمونه در شکل ۲-۵ مقایسه مقادیر ریز مقیاس و درشت مقیاس شده با استفاده از روش عکس مجذور فاصله برخی از ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ در چاه AZA نشان داده شده است. در این محاسبات تنها از مقادیر دو نقطه نزدیک به نقطه مورد نظر برای تخمین مقادیر ویژگی مد نظر استفاده شده است. این عملیات علاوه بر اعمال روی تمام ویژگی‌های ژئومکانیکی بدست آمده از نگارها در فصل مدل سازی چاه، روی نگارهای پتروفیزیکی نیز در دو چاه AZA و RSA اعمال شد.



شکل ۵-۲. مقایسه مقادیر ریز مقیاس (+/۱۵۲۴) و درشت مقیاس شده (یک متر) خواص سنگ با استفاده از روش عکس مجذور فاصله در چاه Aza

۵-۲-۲. میانگین‌گیری

برای تعیین مقادیر افزایش مقیاس یافته نگارهای پتروفیزیکی و خواص سنگ در چاه‌های KFA و RSB، ابتدا تعداد نقاط داده در هر متر برای این دو منبع داده تعیین می‌شود. سپس با استفاده از رابطه زیر مقدار افزایش مقیاس یافته نهایی تعیین می‌شود.

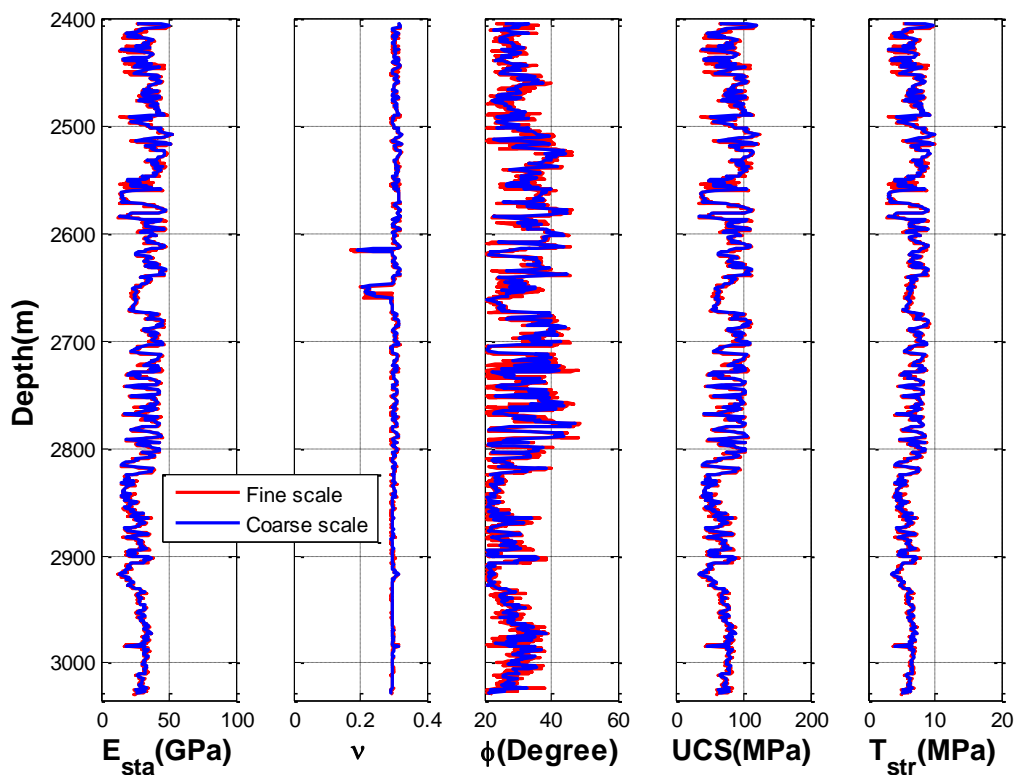
$$a_{ups}^j = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad ۳-۵$$

در این رابطه a_i مقادیر داده‌هایی است که جزء صحیح عمق آن‌ها برابر باشد و n تعداد این داده‌ها می‌باشد. در جدول ۳-۵ شبه کد نوشته شده در نرم‌افزار MATLAB برای محاسبات مقادیر افزایش مقیاس یافته نگارهای پتروفیزیکی و خواص سنگ نشان داده شده است.

جدول ۳-۵. شبه کد نوشته شده در نرم افزار MATLAB به منظور دست یابی به قدرت تفکیک یک متر برای نگارهای چاه پیمایی (با خواص سنگ)

۱- بردار عمق مربوط به نگارهای پتروفیزیکی (یا خواص سنگ) را فرخوانی کن (Depth).
 ۲- برداری با نام FloorDepth ایجاد شود که مقادیر آن برابر جزء صحیح بردار Depth باشد.
 ۳- n را برابر با طول بردار FloorDepth قرار بده.
 ۴- برداری اولیه ای با نام a_UPS و به طول n با مقادیر صفر ایجاد کن.
 ۵- برای هر i از ۱ تا n
 ۵-۱- اندیس هایی از Depth که مقدار جزء صحیح آن ها برابر FloorDepth(i) شود مشخص کن.
 ۵-۲- مقادیر مربوط به اندیس های مشخص شده در مرحله ۵-۱ را از بردار نگار چاه پیمایی (یا خواص سنگ) فراخوانی کن.
 ۵-۳- میانگین مقادیر مرحله ۵-۲ را مشخص کن.
 ۵-۴- $a_UPS(i)$ را برابر مقدار محاسبه شده در مرحله ۵-۳ قرار بده.

برای نمونه در شکل ۳-۵ مقایسه مقادیر ریز مقیاس و درشت مقیاس شده با استفاده از روش میانگین گیری برای برخی از ویژگی های ژئومکانیکی سنگ در چاه KrA نشان داده شده است. این عملیات علاوه بر اعمال روی تمام ویژگی های بدست آمده از نگارها در فصل مدل سازی چاه، روی نگارهای پتروفیزیکی دو چاه KrA و RSB اعمال شد.



شکل ۳-۵. مقایسه مقادیر ریز مقیاس (۱۵۲۴/متر) و افزایش مقیاس یافته (یک متر) خواص سنگ در چاه KrA با استفاده از روش میانگین گیری

۵-۳. مطابقت عمقی منابع اطلاعاتی مختلف

تعیین دقیق عمق در برداشت‌های درون‌چاهی چالش بزرگی است و تفسیر دقیق این داده‌ها ملزم به رفع عدم قطعیت عمق است. به همین لحاظ انجام مطابقت عمقی روی داده‌های بدست آمده از چاه در برداشت‌های مختلف بسیار ضروری است. نگارهای پتروفیزیکی و گل‌نگاری در چاه‌ها در یک ران^۱ برداشت نمی‌شوند. نگارهای برداشت شده در ران‌های مختلف، به دلیل دشواری در پایش دقیق عمق، دقیقاً از یک نقطه عمقی شروع نمی‌شوند. این پدیده حتی در بین نگارهای پتروفیزیکی که در برداشت‌های مختلف بدست می‌آیند نیز وجود دارد. انجام مطابقت عمقی در بین داده‌هایی که از چند برداشت مختلف در یک چاه بدست می‌آیند بسیار ضروری است (Desbrandes, 1985).

در صورتی که نگار مشترکی در بین برداشت‌های مختلف چاه‌پیمایی وجود داشته باشد انجام مطابقت عمقی بسیار ساده است. بررسی نگارهای پتروفیزیکی بدست آمده در چند برداشت مختلف در هر چاه از چاه‌های مورد مطالعه نشان داد که نگار گاما در بین آن‌ها مشترک است؛ بنابراین، با جابه‌جا نمودن یکی از این نگارهای گاما در یک برداشت، به منظور مطابقت توالی تغییرات تابش گاما با نگار گاما در برداشت دیگر، مقدار جابه‌جایی برای نگارهای دیگر بدست می‌آید. به این ترتیب می‌توان مطابقت عمقی را در بین نگارهای پتروفیزیکی ایجاد نمود. البته بایستی اشاره نمود که این مطابقت عمقی قبل از انجام مدل‌سازی یک بعدی چاه روی نگارهای پتروفیزیکی هر یک از چاه‌های مورد مطالعه اعمال شد.

برای مطابقت عمقی بین داده‌های گل‌نگاری و نگارهای پتروفیزیکی نیاز است از گزارش‌های روزانه حفاری استفاده شود. استفاده از گزارش‌های مربوط به خرده‌های حفاری بازگشتی از چاه، شاخص بسیاری خوبی برای مطابقت عمقی بین این دو منبع داده می‌باشد. از طرفی سازندهای شیلی موجب بروز برخی مشکلات حفاری نظیر ناپایداری دیواره چاه و گلی شدن مته^۲ و در نتیجه، کاهش نرخ نفوذ حفاری می‌شوند (De Stefano and Young, 2009; Roy and Cooper, 1993)؛ بنابراین، وجود سازندهای شیلی نیز شاخصی برای انجام مطابقت عمقی بین داده‌های گل‌نگاری و نگارهای پتروفیزیکی می‌باشد.

¹ Run

² Bit balling

۴-۵. تشکیل پایگاه داده

بعد از همسان‌سازی مقیاس داده‌های جمع‌آوری شده از منابع اطلاعاتی مختلف و همچنین مطابقت عمقی آن‌ها، پایگاه داده برای تحلیل بیشتر داده‌ها تشکیل شد. ایجاد پایگاه داده، انجام هر گونه عملیات به منظور ارزیابی رابطه بین نرخ نفوذ و سایر پارامترها و همچنین ایجاد مدلی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از ترکیب سایر پارامترها را تسهیل می‌کند.

به دلیل تنوع منابع اطلاعاتی مختلف، به منظور لحاظ تمامی حالات ممکن و برای تحلیل جامع روابط نرخ نفوذ با پارامترهای تأثیرگذار، دو سطح پایگاه اطلاعاتی تشکیل شد. مطالعات اولیه به منظور شناسایی اهمیت پارامترهای سنگ بر روی سطح اول پایگاه داده انجام خواهد شد. از اینرو؛ سطح اول پایگاه داده خود شامل سه پایگاه داده مختلف است. سطح دوم پایگاه داده بعد از انجام آزمایش نفوذگر و تحلیل شاخص‌های مختلف استخراج شده از نمودار نیرو-نفوذ تشکیل خواهد شد. ویژگی‌های هر یک از این پایگاه داده در جدول ۴-۵ شرح داده شده است. پارامترهای دربرگیرنده هر یک از منابع اطلاعاتی نیز در جدول ۵-۵ اشاره شده است. پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه نسبت به سایر تحقیقات صورت گرفته در زمینه تخمین نرخ حفاری و نیز در زمینه تعیین قابلیت حفاری سازند، بسیار جامع و کامل تر می‌باشد.

جدول ۴-۵. جزئیات پایگاه‌های اطلاعاتی تشکیل شده

توضیحات	منابع اطلاعاتی	شماره پایگاه داده	سطح پایگاه داده
به تفکیک هر چاه	عملیاتی	۱	سطح اول
	عملیاتی و نگارهای پتروفیزیکی	۲	
	عملیاتی و خواص سنگ	۳	
برای هر چاه بعد از انجام آزمایش نفوذگر تشکیل خواهد شد.	عملیاتی و شاخص قابلیت حفاری	۱	سطح دوم

جدول ۵-۵. پارامترهای دربرگیرنده هر یک از منابع اطلاعاتی مورد استفاده

منابع اطلاعاتی	پارامترها (علامت اختصاری)
عملیاتی	عمق (Depth)، نرخ جریان (FR)، چگالی معادل گل در جریان (ECD)، چگالی سیال حفاری (MD)، وزن روی مته (WOB)، سرعت دوران (RPM)، محتوای جامد سیال حفاری (SC)، سائیدگی دندان مته (CT)، نوع مته (BT)، اندازه قطر مته (BS)، فشار منفذی (PP)، نرخ نفوذ (ROP)، گرانروی (MV) و نقطه تسلیم سیال حفاری (MYP)، گرانروی پلاستیک سیال حفاری (MPV)، درصد آب (MWR) و نفت (MO) در گل حفاری، فشار پمپ (PuP)، گشتاور (Tor)
نگارهای پتروفیزیک	نگار گاما (GR)، تخلخل (NPHI)، چگالی (RHOB)، کندی موج فشاری (DTCO) و برشی (DTSM)، کالیپر (Cal)، مقاومت الکتریکی (RT)
ویژگی‌های سنگ	محتوای رس (V_{Sh})، تخلخل (NPHI)، چگالی (RHOB)، مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، مقاومت کششی (TS)، ضریب یانگ (E)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، ضریب پواسون (ν)، مقاومت فشاری محصور شده (CCS)، مدول برشی (G)، مدول بالک (K)

۵-۵. تحلیل توصیفی پارامترهای مورد مطالعه

در جدول ۵-۶ محدوده تغییرات نگارهای پتروفیزیکی برداشت شده در چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. نگار مقاومت ویژه الکتریکی در همه چاه‌ها به جز چاه KrA برداشت شده است. بررسی محدوده تغییرات داده‌ها کمک شایانی در شناسایی داده‌های دورافتاده و نوفه‌دار می‌کند (Berthold and Hand, 2003). برای نمونه می‌توان به مقادیر کندی موج صوتی اشاره نمود. بسیاری از مواد با کندی موج صوتی قابل شناسایی هستند (Alford et al., 2012). کمترین سرعت موج برشی ثبت شده در چاه RSA حدود ۶۵۲/۲۷ متر بر ثانیه (۴۶۷/۴۱ میکروثانیه بر فوت) می‌باشد. این سرعت موج برشی برای ماسه سنگ‌ها و گراول‌هایی است که به صورت دانه‌ای و با تخلخل بسیار بالا می‌باشند (Schön, 2011). بررسی نقطه عمقی متناظر با این سرعت موج برشی نشان داد که جنس سنگ، آهک شیلی می‌باشد که دارای تخلخل حدود ۲۰ درصد می‌باشد. از طرفی نگار چگالی بسیار حساس به قطر چاه می‌باشد (Reinecker et al., 2003)؛ بنابراین، در نواحی که قطر چاه بیشتر از قطر مته باشد نگار چگالی بایستی تصحیح شود. در جدول ۵-۷ مقادیر کمینه و بیشینه ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ نشان داده شده است. با توجه به اینکه این ویژگی‌ها از نگارهای پتروفیزیکی محاسبه شده‌اند، تدابیر مربوط به تصحیحات انجام شده روی نگارهای پتروفیزیکی، روی این داده‌ها نیز بایستی اعمال شود.

جدول ۵-۶. محدوده تغییرات نگارهای پتروفیزیکی اندازه‌گیری شده به تفکیک چاه‌ها

چاه RSB		چاه RSA		چاه KrA		چاه AzA		پارامتر
بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	
۲۷۷۸	۲۵۴۶	۳۳۹۱	۲۸۷۳	۳۰۲۸	۲۴۰۴	۳۰۷۹/۴۰	۲۵۸۷/۶۰	عمق (m)
۱۰۵/۰۶	۱۶/۹۰	۱۴۶/۸۰	۱/۹۸	۱۲۸/۱۰	۷/۸۶	۱۵۲/۲۰	۸/۸۲	گاما (GAPI)
۰/۲۹۲۷	۰/۰۰۶۲	۰/۳۲۴۷	۰/۰۰۲۳	۰/۳۶۰۴	۰/۰۰۳۳	۰/۵۲۱۵	۰/۰۱۶۰	تخلخل (V/V)
۲/۸۸	۲/۲۹	۲/۸۵	۲/۲۶	۲/۸۳	۲/۳۱	۲/۸۷	۱/۸۷	چگالی (G/C3)
۸۱/۹۴	۴۹/۳۵	۱۶۵/۸۵	۴۶/۵۱	۹۳/۴۶	۴۹/۱۱	۹۲/۲۶	۵۲/۸۵	کندی موج فشاری (us/ft)
۱۴۲/۵۹	۹۰/۶۳	۴۶۷/۴۱	۹۳/۳۱	۱۷۹/۳۶	۹۶/۵۱	۲۱۵/۳۳	۸۹/۴۷	کندی موج برشی (us/ft)
۲۲۷/۹۶	۱/۷۶	۸۴۵/۱۱	۳/۲۱	-	-	۱۴۴/۷۰	۰/۱۷	مقاومت الکتریکی (OHMM)
۱۱/۲۵	۸/۴۶	۸/۱۰	۶/۰۱	۸/۸۷	۸/۳۴	۱۵/۹۷	۸/۲۷	کالیپر (in)

جدول ۵-۷. محدوده تغییرات خواص سنگ به تفکیک چاه‌ها

چاه RSB		چاه RSA		چاه KrA		چاه AzA		پارامتر
بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	
۰/۹۶۶۹	۰/۰۰۶۶	۰/۹۹۳۸	۰/۰۰۰۲	۰/۷۷۷۱	۰/۰۰۲۸	۰/۹۹۲۱	۰/۰۰۲۳	محتوای رس (V/V)
۵۱/۴۱	۱۸/۷۱	۵۱/۲۴	۲/۱۷	۵۲/۴۲	۱۳/۴۳	۴۹/۴۴	۷/۵۸	مدول یانگ (GPa)
۲۱/۱۷	۷/۴۸	۱۹/۱۹	۰/۷۶	۱۹/۷۸	۵/۰۸	۲۰/۸۱	۲/۷۲	مدول برشی (GPa)
۴۹/۸۸	۱۲/۵۲	۵۱/۷۲	۵/۰۳	۵۰/۰۲	۱۲/۱۶	۴۱/۱۱	۹/۰۵	مدول بالک (GPa)
۰/۳۲۸	۰/۱۶۱	۰/۴۲۸	۰/۲۹۴	۰/۳۲۵	۰/۱۹۰	۰/۳۹۶	۰/۱۳۴	ضریب پواسون
۴۵/۱۴	۲۱/۴۴	۴۹/۲۲	۲۰/۸۷	۴۷/۰۴	۲۰/۸۸	۴۴/۴۰	۲۰/۸۷	زاویه اصطکاک داخلی (deg)
۱۲۱/۴۰	۴۷/۱۷	۱۲۱/۰۲	۹/۶۳	۱۲۳/۷۰	۳۵/۱۸	۱۱۶/۹۳	۲۱/۹۱	مقاومت فشاری تک محوره (Mpa)
۱۱/۷۵	۴/۷۲	۹/۶۸	۰/۸۱	۹/۹۹	۲/۹۲	۹/۳۶	۱/۹۷	مقاومت کششی (Mpa)
۱۸۷/۲۷۷	۶۷/۲۰۰	۲۶۰/۲۰۸	۲۷/۵۱۶	۲۱۱/۱۲۵	۴۶/۱۱۳	۲۱۴/۶۵۴	۳۲/۱۳۵	مقاومت فشاری محصور شده (Mpa)

در جدول ۵-۸ به محدوده تغییرات پارامترهای عملیاتی در چاه‌های مورد مطالعه اشاره شده است. بررسی این داده‌ها نیز نشان می‌دهد که پارامترهای عملیاتی نیز دارای مقادیر غیر منطقی در برخی نقاط عمقی است. به عنوان نمونه نرخ جریان حفاری دارای مقدار بیشینه بالای ۲۰ هزار گالن بر دقیقه در چاه RSA می‌باشد. این مقدار برای نرخ جریان غیرمنطقی است و امکان پمپ سیال با این نرخ

جریان در چاه امکان پذیر نمی باشد. از طرفی؛ مقایسه مقادیر نرخ نفوذ در چاه های مورد مطالعه نشان می دهد که در چاه RSA پراکندگی نرخ نفوذ در محدوده عمقی مورد مطالعه بیشتر از سایر چاه های مورد مطالعه است. همچنین بیشینه نرخ نفوذ بدست آمده در این چاه، حدود ۴ برابر بیشینه نرخ نفوذ بدست آمده در سازندهای مشابه چاه های دیگر است؛ بنابراین، نیاز است داده های این چاه به دلیل وجود خطا بررسی شود. همان طور که در این جدول مشاهده می شود پارامتر گشتاور در همه چاه ها به غیر از چاه AZA برداشت شده است.

جدول ۵-۸. محدوده تغییرات پارامترهای عملیاتی به تفکیک چاه ها

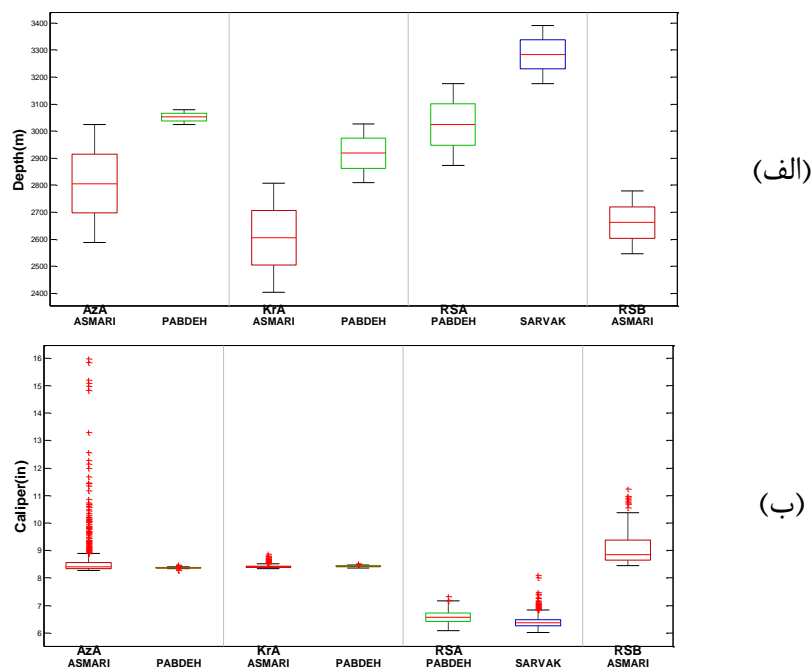
چاه RSB		چاه RSA		چاه KTA		چاه AZA		پارامتر
بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	
۸/۵	۸/۵	۶/۱۲۵	۶/۱۲۵	۸/۵	۸/۵	۸/۵	۸/۵	قطر مته (in)
۳۲	۲۹	۴۹	۴۲	۴۰	۳۴	۴۶	۲۱	گرانروی گل (CP)
۷	۰	۱۳	۷	۴	۳	۱۴	۰	نقطه تسلیم گل (lb/100ft ²)
۷	۰	۲۳	۱۶	۷	۶	۲۲	۱	گرانروی پلاستیک گل (CP)
۹۸	۹۸	۸۷	۱۲	۱۰	۱۰	۹۳	۲۴	آب در گل (%)
۰	۰	۷۵	۰	۸۴	۸۰	۵۲	۰	نفث در گل (%)
۵۰۵/۹۴	۳۸۱/۹۲	۲۰۶۸۷/۳۳	۶۸/۵۱	۴۰۸/۷۶	۲۰۱/۸۰	۵۵۳/۳۳	۱۸۴/۱۰	نرخ جریان (gal/min)
۶۳/۵۲۱	۵۳/۴۴۱	۸۷/۲۱۲	۵۸/۶۳۱	۵۹/۳۹۶	۵۵/۸۹۲	۷۹/۶۰۵	۶۷/۸۷۲	چگالی معادل گل در جریان (pcf)
۲۰	۲۰	۱۴	۱۱	۱۰	۶	۲۴	۷	محتوای جامد (%)
۶۳/۱۳	۶۳/۱۳	۷۰/۲۴	۴۲/۹۲	۵۶/۱۲	۴۶/۰۵	۷۷/۹۷	۶۶/۰۱	چگالی سیال حفاری (pcf)
۱۱۲۳/۳۲	۴۷۰/۸۶	۲۴۸۰/۶۳	۸۴/۴۵	۵۴۶۵/۶۲	۱۵۹۷/۸۶	۱۰۹۶/۴۲	۳۷۳/۰۲	فشار پمپ (psi)
۲۴/۷۸	۲۳/۰۵	۲۹/۱۲	۲۵/۲۵	۲۲/۶۲	۱۸/۳۹	۲۷/۱۷	۲۲/۸۳	فشار منفذی (MPa)
۰/۱	۰/۰۸۸	-	-	۳/۵۴۵۳	۰/۰۰۰۲	-	-	سائیدگی دندان مته
۸/۹۲	۸/۳۵	۳۲/۷۸	۰	۱۸/۹۹۶	۰/۱۶۱	۳۲/۹۴	۳/۲۵	وزن روی مته (klbf)
۱۰۳۶۹/۸۹	۱۰۳۶۹/۸۹	۳۷۲۵/۳	۴۷/۷۱	۲۲۲/۷۵	۰	۲۰۲/۱۷	۳۱/۸۱	سرعت دوران (rpm)
۶۲۷/۸۳۹	۲۸/۶۴۹	۲۲۲/۷۹	۰	۱۲۴/۵۰	۵۱/۰۳	-	-	گشتاور (daN.m)
۱۱/۳۹	۱/۰۹	۴۶/۱۲	۰/۱۷	۸/۸۷	۰/۲۵	۱۴/۳۴	۰/۶۲	نرخ نفوذ (m/h)

در جدول ۵-۹ تعداد داده ها به تفکیک سازند و چاه اشاره شده است. همانطور که دیده می شود در چاه RSA و AZA به علت کوچک بودن مقیاس داده ها، تعداد نقاط داده بیشتر است.

جدول ۵-۹. تعداد داده‌ها در هر چاه به تفکیک سازند

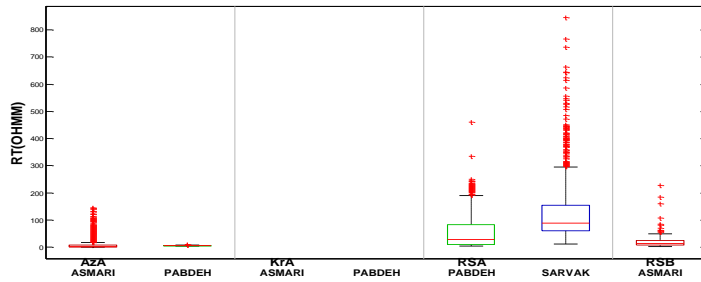
نام سازند	AzA	KrA	RSA	RSB
آسماری	۲۱۸۶	۴۰۵	-	۲۳۳
پابده	۲۷۴	۲۲۰	۱۵۱۸	-
سروک	-	-	۱۰۷۳	-
مجموع	۲۴۶۰	۶۲۵	۲۵۹۱	۲۳۳

استفاده از نمودارهای جعبه‌ای می‌تواند علاوه بر نشان دادن محدوده تغییرات پارامترها در هر سازند و چاه، در تشخیص داده‌های دورافتاده در هر پارامتر نیز کمک شایانی نماید. در شکل ۵-۴ مقایسه نمودار جعبه‌ای عمق و کالیپر به تفکیک سازند و چاه نشان داده شده است. همان‌طور که در قسمت (الف) این شکل مشاهده می‌شود سازندهای مورد مطالعه در چاه RSA در قسمت عمیق‌تری نسبت به سایر چاه‌ها قرار دارند. همچنین مشاهده می‌شود که ضخامت سازند آسماری از ضخامت سازند پابده و ضخامت سازند پابده از ضخامت سازند سروک در چاه‌های متناظر آن‌ها بیشتر است. همان‌طور که در شکل ۵-۴ (ب) مشاهده می‌شود قطر چاه‌های مورد مطالعه در سازند آسماری نسبت به سازند پابده بیشتر است. این مطلب به معنی آن است که چاه‌ها در سازند آسماری دچار مشکلات ناپایداری بیشتری هستند. نتیجه حاصل از این شکل مطابقت خوبی با نتیجه حاصل از بررسی گزارش‌های حفاری دارد. البته مخازن کربناته اصولاً به دلیل وجود شکستگی‌های طبیعی فرآیند حفاری را مشکل‌ساز می‌کنند. مطابقت نتایج گزارش‌های حفاری با نتایج حاصل از تفسیر نمودار جعبه‌ای نگار کالیپر، با فرض نادیده گرفتن شکستگی‌های طبیعی است. البته بایستی در نظر داشت که قطر مته مورد استفاده در چاه RSA کمتر از سایر چاه‌ها می‌باشد. هرچند این امر در جهت حفظ پایداری دیواره چاه کمک می‌نماید ولی مشکلات حفاری نسبتاً بیشتری نسبت به سایر چاه‌ها در این چاه مشاهده شده است.

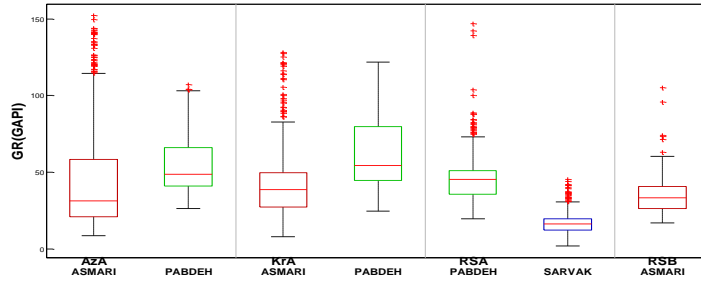


شکل ۴-۵. مقایسه نمودار جعبه‌ای عمق و (ب) کالیپر به تفکیک سازند و چاه

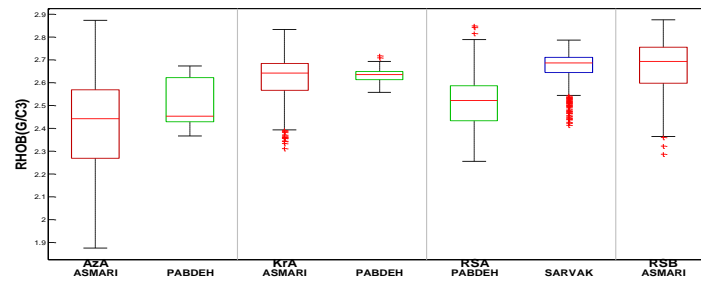
در شکل ۵-۵ نمودار جعبه‌ای نگارهای پتروفیزیکی برداشت شده به تفکیک سازند و چاه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود داده‌های دورافتاده تقریباً در تمامی چاه و در همه نگارهای پتروفیزیکی وجود دارد. تعداد این داده‌ها در چاه RSA نسبت به سایر چاه‌ها بیشتر می‌باشد. شکل ۵-۵ (الف) نشان می‌دهد که مقاومت الکتریکی سازند در چاه RSA نسبت به سایر چاه‌ها بیشتر است و نشان می‌دهد که محتوای نفت و گاز در این چاه نسبت به سایر چاه‌ها بیشتر است. هرچند این نگار در چاه KTA برداشت نشده است. شکل ۵-۵ (ج) و (د) به ترتیب نشان می‌دهند که پراکندگی تغییرات چگالی و تخلخل در سازند آسماری نسبت به دو سازند دیگر بیشتر است. شکل ۵-۵ (ه) و (و) نشان می‌دهد که سازند آسماری در دو چاه KTA و RSA از استحکام بالاتری نسبت به سازندهای پایده و آسماری در سایر چاه‌ها برخوردار هستند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که سازند سروک نیز از استحکام بالایی نسبت به سازندهای دیگر برخوردار است.



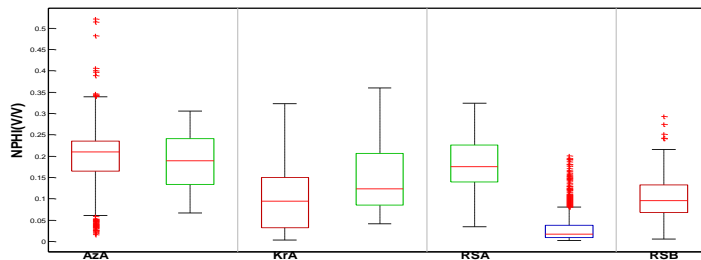
(الف)



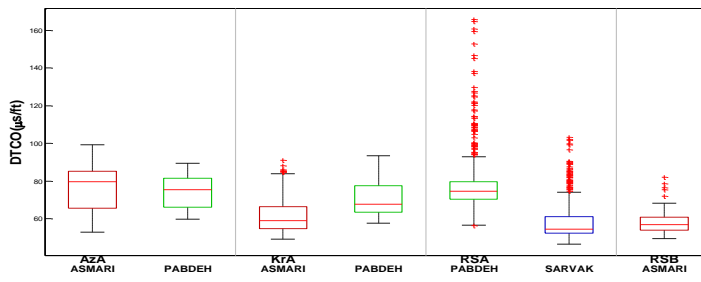
(ب)



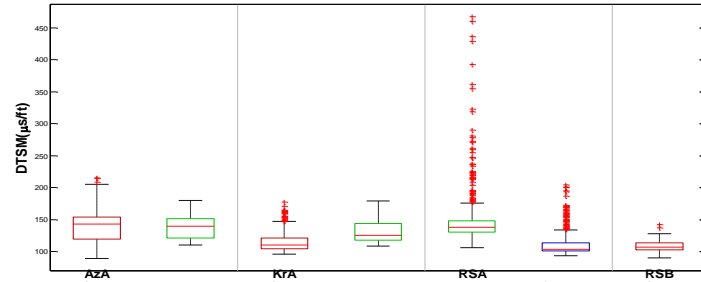
(ج)



(د)



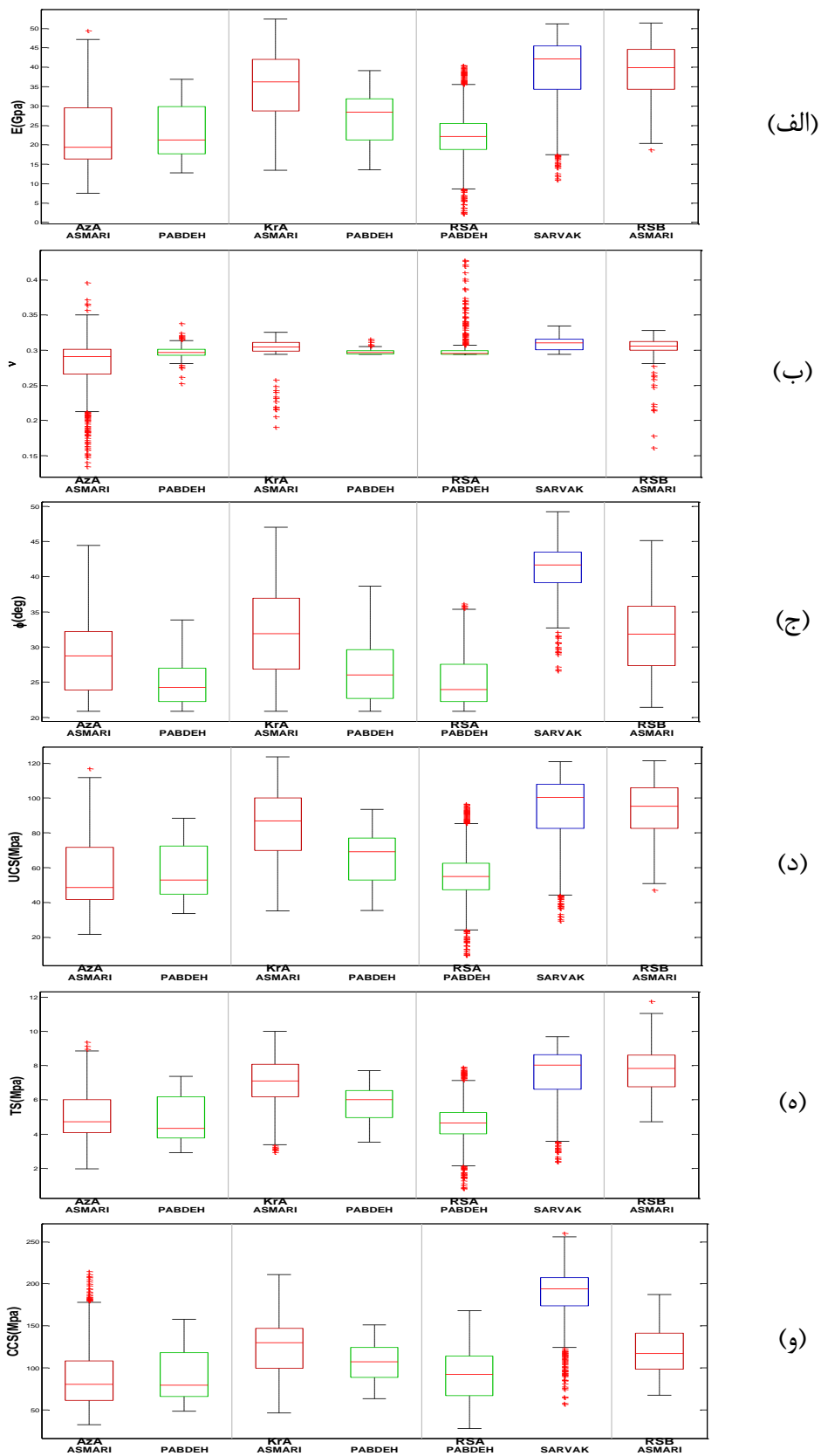
(ه)



(و)

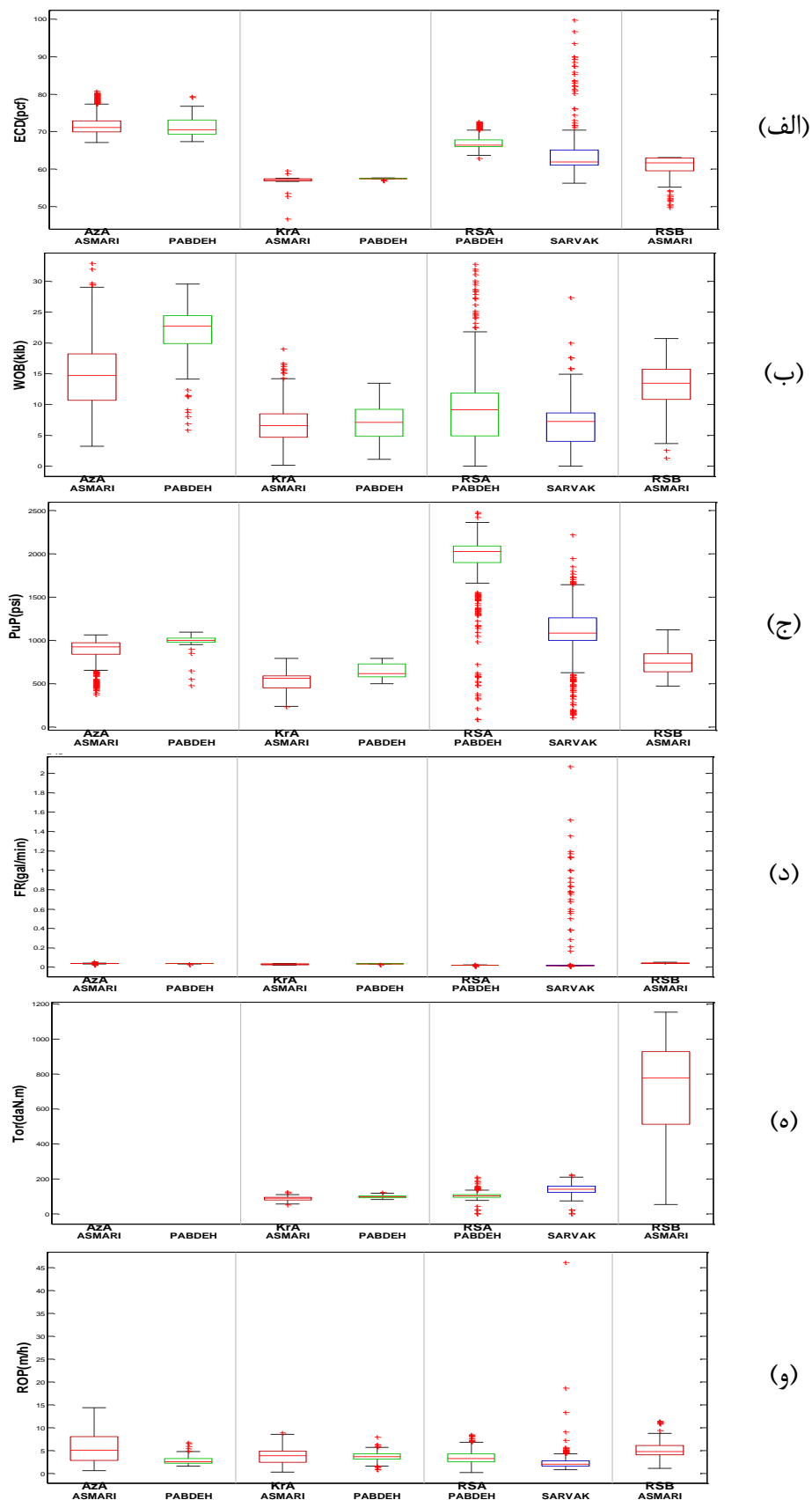
شکل ۵-۵. مقایسه نمودار جعبه‌ای نگارهای پتروفیزیکی به تفکیک سازند و چاه: (الف) مقاومت ویژه، (ب) گاما، (ج) چگالی، (د) تخلخل، (ه) کندی موج صوتی فشاری و (و) کندی موج صوتی برشی

شکل ۵-۶ مقایسه نمودار جعبه‌ای برخی از ویژگی‌های سنگ را به تفکیک سازند و چاه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقادیر ویژگی‌های سنگ در چاه RSA به شدت از عوامل نوفه تأثیر پذیرفته است. شکل ۵-۶ (الف) نشان می‌دهد که مقادیر مدول یانگ در سازند آسماری تقریباً بیشتر از مقادیر این پارامتر در سازند پابده می‌باشد. هرچند محدوده تغییرات مقادیر این پارامتر در چاه AZA برای هر دو سازند نامبرده شده تقریباً با هم برابر است. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر این پارامتر در سازند سروک از مقادیر این پارامتر در سایر سازندها تقریباً بیشتر است. این مطلب بدان معنی است که مقاومت تغییر شکل الاستیک در سازند سروک نسبت به سایر سازندها و در سازند آسماری نسبت به سازند پابده بیشتر است. شکل ۵-۶ (ب) نشان می‌دهد که محدوده تغییرات ضریب پواسون در همه سازندهای چاه‌های مورد مطالعه یکسان و تقریباً دارای مقادیر برابر می‌باشند. البته مقادیر این پارامتر در همه چاه‌های مورد مطالعه از عوامل نوفه تأثیر پذیرفته است. در شکل ۵-۶ (ج) مشاهده می‌شود که مقادیر زاویه اصطکاک داخلی در سازند آسماری و سروک به مراتب بیشتر از مقادیر این پارامتر در سازند پابده می‌باشد؛ بنابراین، با توجه به مقادیر زاویه اصطکاک داخلی می‌توان گفت مقاومت برشی سازندهای آسماری و سروک بیشتر از سازند پابده در چاه‌های مورد مطالعه است. محدوده تغییرات مقاومت تک محوری و کششی برای هر سازند در شکل ۵-۶ (د) و (ه) نتایج حاصل از تحلیل مقادیر مدول یانگ برای هر سازند را تایید می‌کنند. شکل ۵-۶ (و) نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت فشاری محصور شده در سازند سروک نسبت به سایر سازندها بیشتر است. مقادیر این پارامتر در سازندهای آسماری و پابده تقریباً برابر و مشابه و در سازند سروک نسبت به دو سازند دیگر بیشتر است.



شکل ۵-۶. مقایسه نمودار جعبه‌ای برخی از ویژگی‌های سنگ به تفکیک سازند و چاه: (الف) مدول یانگ، (ب) ضریب پواسون، (ج) زاویه اصطکاک داخلی، (د) مقاومت تک محوری و (ه) کششی و (و) فشاری محصور شده

مقایسه نمودار جعبه‌ای برخی از پارامترهای حفاری در شکل ۷-۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود داده‌های دورافتاده در اکثر پارامترهای حفاری برداشت شده در سازندهای مورد مطالعه وجود دارد. شکل ۷-۵ (الف) نشان می‌دهد که چگالی معادل در جریان چاه KrA نسبت به سایر چاه‌های مورد مطالعه کمتر است. مقادیر وزن روی مته مورد استفاده در چاه AZA نسبت به سایر چاه‌های مورد مطالعه بالاتر است (شکل ۷-۵ (ب)). در شکل ۷-۵ (ج) مشاهده می‌شود که مقادیر فشار پمپ در چاه RSA بیشتر از سایر چاه‌ها است. مقادیر فشار پمپ همخوانی خوبی با عمق حفاری در چاه‌های مورد مطالعه دارد. شکل ۷-۵ (د) نشان می‌دهد که مقادیر نرخ جریان مورد استفاده در چاه‌های مورد مطالعه یکسان است. مقادیر گشتاور مورد استفاده در چاه RSB به صورت بسیار محسوسی بیشتر از مقادیر این پارامتر در سایر چاه‌ها است (شکل ۷-۵ (ه)). مقایسه مقادیر نرخ نفوذ در سازندهای مورد مطالعه در شکل ۷-۵ (و) نشان می‌دهد که تفاوت بسیار کمی میان مقادیر این پارامتر برای سازندهای مختلف وجود دارد. با این وجود می‌توان گفت مقادیر نرخ نفوذ در سازند آسماری نسبت به دو سازند دیگر و در سازند پابده نسبت به سازند سروک بیشتر است. این پدیده مطابقت خوبی با عمق این سازندها در این چاه‌ها دارد.



شکل ۵-۷. مقایسه نمودار جعبه‌ای پارامترهای عملیاتی به تفکیک سازند و چاه: (الف) چگالی جریان معادل، (ب) وزن روی مته، (ج) فشار پمپ، (د) نرخ جریان، (ه) گشتاور و (و) نرخ نفوذ

۵-۶. کاهش نوفه

داده‌های واقعی که ورودی الگوریتم‌های پردازش داده هستند از عوامل متعددی تأثیر می‌پذیرند؛ از میان آن‌ها، حضور نوفه یک فاکتور کلیدی است (Wang et al., 1995). چندین تعریف برای نوفه در ادبیات آماری و یادگیری ماشینی ارائه شده است. اکثر آن‌ها موافق هستند که داده‌های نوفه‌دار می‌تواند بر فرآیند یادگیری تأثیر بگذارد (Quinlan, 1986) و زمان یادگیری را افزایش دهد. علاوه بر این حضور نوفه در داده‌ها می‌تواند استخراج قوانین از داده‌ها را در مدل‌های یادگیری ماشینی دچار مشکل نماید که این امر منجر به عملکرد نامناسب آن‌ها در فرآیند پیش‌بینی داده‌های جدید می‌شود (García et al., 2013; Lorena and de Carvalho, 2004). نوفه یک مسئله غیرقابل اجتناب در اندازه‌گیری داده‌ها است. برخی مطالعات تخمین زدند که حتی در شرایط کنترلی حداقل ۵٪ خطا در مجموعه داده‌ها وجود دارد (Maletic and Marcus, 2000; Wu, 1995). ژئوفیزیک‌ها اذعان دارند که همه اندازه‌گیری‌های خواص محیطی متأثر از نوفه می‌باشد (Cardiff and Kitanidis, 2010).

مهمترین قدم در کاهش نوفه، تشخیص منبع نوفه می‌باشد. عواملی همچون تغییر شیف‌کاری مهندسی حفاری، تعمیر و جایگزینی قطعات ابزار حفاری، لرزش رشته حفاری، شسته شدن دیواره چاه^۱ (به طور کلی شکل هندسی چاه) و تغییرات در لایه‌های زمین‌شناسی می‌تواند موجب وجود خطا در داده‌های برداشت شده در چاه و یا ایجاد قله‌های ناگهانی^۲ در مقادیر برداشت شده شوند. روش حفاری روی فرآیند حفاری و کیفیت داده‌ها تأثیر می‌گذارد (Gui, 2008). در بخش قبل به نمونه‌هایی از وجود نوفه و داده‌های دورافتاده اشاره شد. از آنجایی که راهکار رایج، حذف نوفه از داده‌ها می‌باشد، بسیار مهم است که نوفه از داده‌های سالم تشخیص داده شود (García et al., 2013). دو روش رایج برای تشخیص نوفه‌های تصادفی، تحلیل طیفی^۳ و تحلیل همبستگی خودکار^۴ است (Gui, 2008).

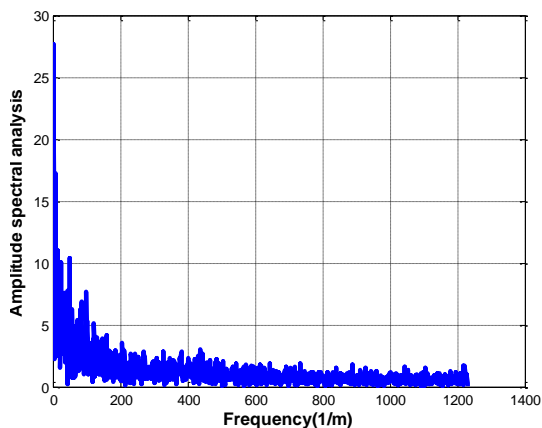
برای پارامترهای مورد مطالعه، تحلیل طیفی و تحلیل همبستگی خودکار انجام شد. در شکل ۵-۸، دو نمونه از تحلیل طیف دامنه برای پارامترهای مقاومت فشاری محصور شده (ویژگی سنگ) و وزن روی مت (پارامتر عملیاتی) در چاه AZA نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نوفه در این پارامترها اثر گذاشته است و شدت این تأثیرات در پارامترهای مربوط به ویژگی‌های سنگ بیشتر است.

¹ Washout

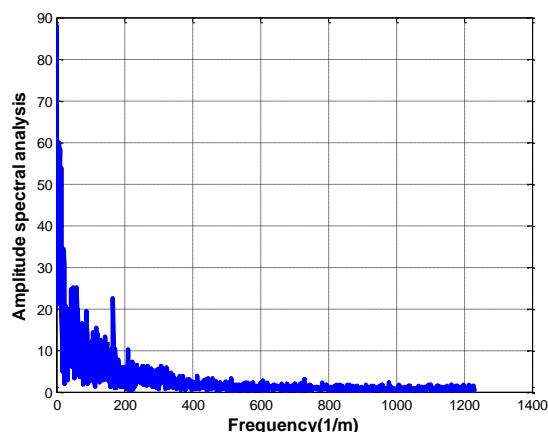
² Spikes

³ Spectral analysis

⁴ Auto-correlation analysis



(ب)



(الف)

شکل ۵-۸. تحلیل طیف دامنه (الف) مقاومت فشاری محصور شده و (ب) وزن روی مته در چاه AZA

هر سیگنالی را می‌توان به دو بخش جزئیات و تقریب تجزیه نمود. برای بسیاری از سیگنال‌ها محتویات فرکانس پایین یا بخش تقریب بسیار مهم می‌باشد. در حقیقت محتویات فرکانس پایین به سیگنال هویت می‌دهد. در مقابل، بخش جزئیات دارای فرکانس بالا می‌باشند و به عنوان نوفه شناخته می‌شوند. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای کاهش اثر نوفه و قله‌های ناگهانی، هموارسازی داده‌ها می‌باشد (Shier, 2004). از اینرو؛ برای کاهش اثر نوفه از داده‌های مورد مطالعه در این تحقیق از فیلتر هموارسازی ساویتزکی - گولایی (۱۹۶۴) استفاده شد. این روش از یک تابع چند جمله‌ای (همانند رابطه ۴-۵) برای حذف اثر نوفه از داده‌ها (x) استفاده می‌کند که نتایج این تابع (x_{new}) می‌توانند، به عنوان مقادیر هموارسازی شده، جایگزین مقادیر اولیه (برداشت شده) شوند. در این روش، برازش تابع چند جمله‌ای با درجه n به تعدادی نقاط در یک بازه (m)، با استفاده از حداقل مربعات خطا^۱ (کمینه سازی رابطه ۵-۵) انجام می‌شود. تعداد نقاط واقع در این محدوده بایستی فرد و از درجه چند جمله‌ای بیشتر باشد. افزایش درجه چند جمله‌ای و یا کاهش تعداد نقاط بازه موجب حفظ بیشتر ساختار داده و کاهش مقدار هموارسازی آن خواهد شد. از طرفی کاهش درجه چند جمله‌ای و یا افزایش تعداد نقاط بازه موجب از بین رفتن قسمت‌هایی از ساختار داده و افزایش مقدار هموارسازی خواهد شد؛ بنابراین، تعیین درجه چند جمله‌ای و تعداد نقاط واقع در بازه از اهمیت بالایی برخوردار است. برای بدست آوردن مقادیر بهینه این دو متغیر، گزارش‌های روزانه حفاری چاه‌های مورد مطالعه و ساختار زمین‌شناسی میداین مورد مطالعه بررسی شد. براساس نتایج این بررسی، مقادیر بهینه درجه چند جمله‌ای و تعداد نقاط بازه انتخاب شده برای داده‌های مورد بررسی در جدول ۵-۱۰ ارائه داده شده است. با توجه به این‌که در چاه‌هایی با مقیاس یک متر برای داده‌های گل نگاری، افزایش مقیاس

¹ Least square error

نگارهای پتروفیزیکی و ویژگی‌های سنگ بیشتر از داده‌های متناظر در سایر چاه‌ها بوده است، نیاز به هموارسازی کمتری داشته‌اند؛ بنابراین، مقادیر بهینه درجه چند جمله‌ای و تعداد داده‌های بازه به گونه‌ای بدست آمده‌اند که ساختار تغییرات داده بیشتر حفظ شود.

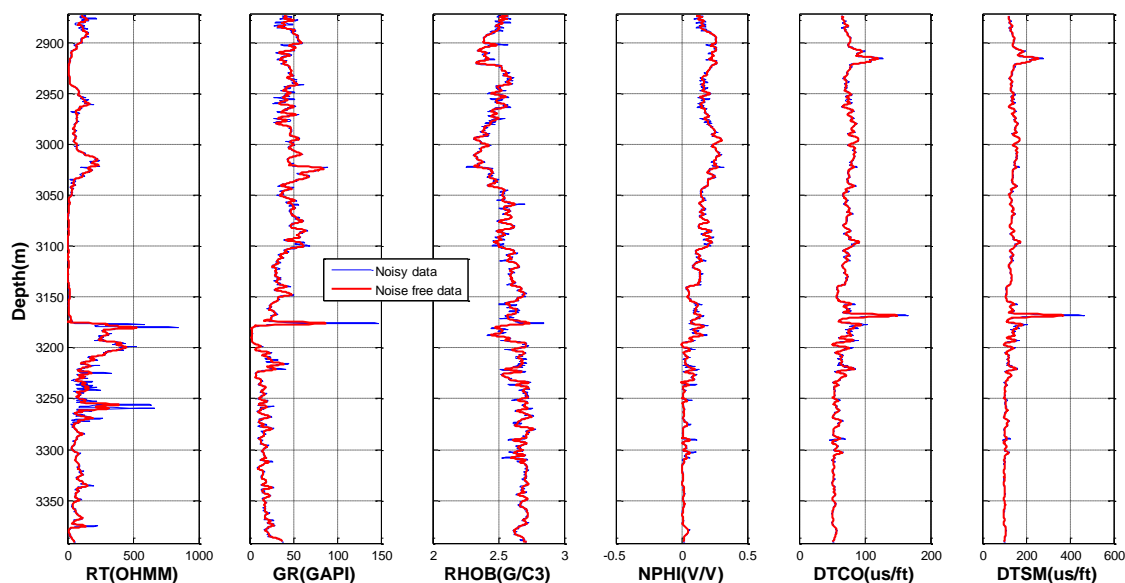
$$x_{new} = \sum_{i=0}^n c_i x^i \quad ۴-۵$$

$$SE = \sum_{j=1}^m (x_j - x_{newj}) \quad ۵-۵$$

جدول ۵-۱۰. مقادیر بهینه بدست آمده برای درجه چند جمله‌ای و تعداد نقاط بازه برای منابع اطلاعاتی مختلف در هر چاه

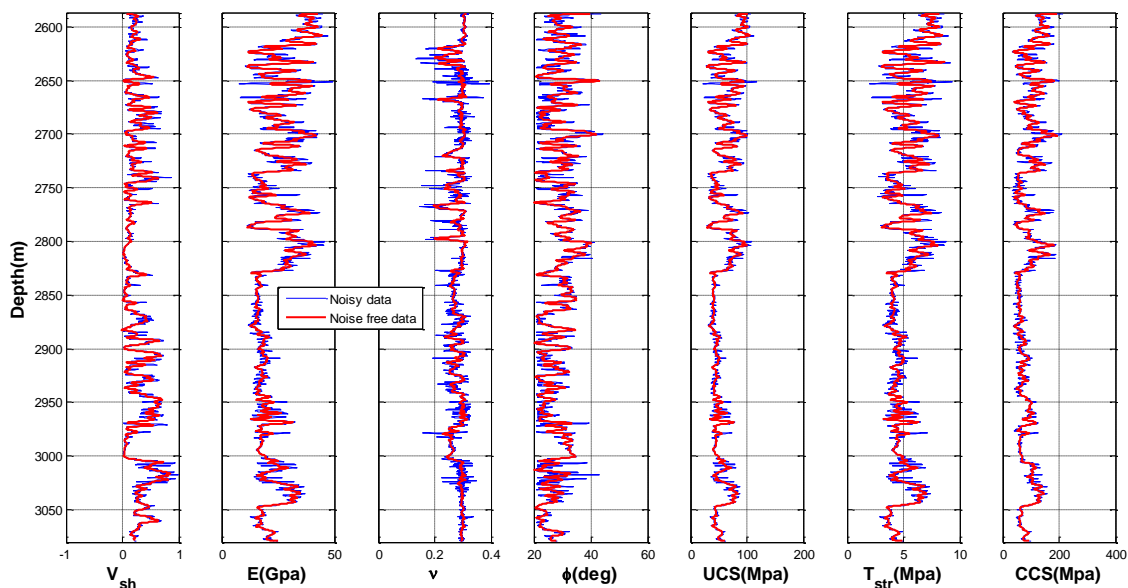
نام چاه	منبع اطلاعاتی	درجه چند جمله‌ای (n)	تعداد نقاط بازه (m)
AzA	نگارهای پتروفیزیکی	۳	۲۵
	ویژگی‌های ژئومکانیکی	۳	۲۵
	گل نگاری	۳	۲۱
KrA	نگارهای پتروفیزیکی	۴	۱۷
	ویژگی‌های ژئومکانیکی	۴	۱۷
	گل نگاری	۳	۲۱
RSA	نگارهای پتروفیزیکی	۳	۲۵
	ویژگی‌های ژئومکانیکی	۳	۲۵
	گل نگاری	۳	۲۱
RSB	نگارهای پتروفیزیکی	۴	۱۵
	ویژگی‌های ژئومکانیکی	۴	۱۵
	گل نگاری	۳	۱۷

در شکل ۵-۹ مقایسه بین نگارهای پتروفیزیکی نوفه‌زدایی شده و برداشت شده در چاه RSA نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نگارهای نوفه‌زدایی شده به خوبی ساختار تغییرات (بخش تقریب) نگارهای برداشت شده در چاه را نشان می‌دهند و تنها تغییرات ناگهانی (قله) در این نمودارها حذف و تغییرات منحنی‌ها نرم‌تر شده است. میانگین اختلاف بین داده‌های نوفه‌زدایی شده و داده‌های برداشت شده در این منبع اطلاعاتی برای چاه‌های مورد مطالعه کمتر از ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۵-۹. مقایسه بین نگارهای پتروفیزیکی نوفه‌زدایی شده و برداشت شده در چاه RSA

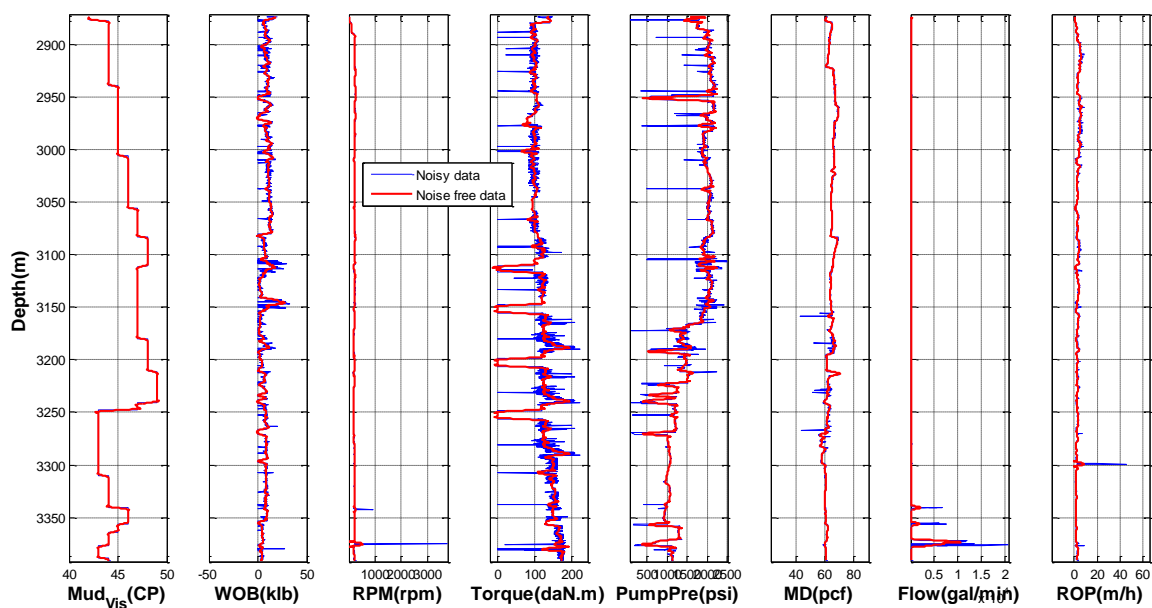
در شکل ۵-۱۰ مقایسه بین برخی ویژگی‌های سنگ نوفه‌زدایی شده و محاسبه شده از نگارهای پتروفیزیکی چاه RSA نشان داده شده است. با توجه به این که این ویژگی‌ها (آغشته به نوفه) از چند نگار پتروفیزیکی محاسبه شده‌اند اثرات نوفه در این ویژگی‌ها بسیار محسوس است. در این شکل هم مشاهده می‌شود که ساختار داده در ویژگی‌های نوفه‌زدایی شده به خوبی حفظ شده است و تنها، اثر تغییرات ناگهانی محلی در داده‌ها کاهش یافته است. میانگین اختلاف بین داده‌های نوفه‌زدایی شده و محاسبه شده از نگارهای پتروفیزیکی در این منبع اطلاعاتی در چاه‌های مورد مطالعه حدود ۸ درصد می‌باشد.



شکل ۵-۱۰. مقایسه بین برخی ویژگی‌های سنگ نوفه‌زدایی شده با ویژگی‌های مناظر محاسبه شده از

نگارهای پتروفیزیکی چاه RSA

شکل ۵-۱۱ مقایسه بین برخی پارامترهای عملیاتی نوفه‌زدایی شده و برداشت شده در چاه RSA را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود روند تغییرات منحنی در داده‌های نوفه‌زدایی شده به خوبی بیانگر روند تغییرات داده‌های برداشت شده می‌باشد. همچنین افت‌های ناگهانی و محلی گشتاور که به دلیل وجود مشکلات حفاری است در داده‌های نوفه‌زدایی شده کاهش یافته است. میانگین اختلاف بین داده‌های نوفه‌زدایی شده و داده‌های برداشت شده سر چاه در این منبع اطلاعاتی برای چاه‌های مورد مطالعه کمتر از ۶ درصد می‌باشد.



شکل ۵-۱۱. مقایسه بین برخی پارامترهای عملیاتی نوفه‌زدایی شده و برداشت شده در چاه RSA

۵-۷. بررسی هم‌خطی داده‌ها

در آمار، هم‌خطی پدیده‌ای است که در آن دو یا بیشتر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در رگرسیون چند متغیره همبستگی شدیدی داشته باشند (Dormann et al., 2013). به این معنی که یکی از آن‌ها به صورت خطی از سایر پارامترها با دقت قابل توجهی بدست آید (Shieh and Fouladi, 2003). اگر هدف پیش‌بینی متغیر وابسته از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده باشد، هم‌خطی مشکلی ایجاد نمی‌کند. اما اگر هدف درک چگونگی تأثیر متغیرهای پیش‌بینی‌کننده روی متغیر وابسته باشد، در این صورت هم‌خطی مشکل بزرگی است (Paul, 2006). هم‌خطی به صورت جزئی و میانه مشکل‌ساز نیست. هرچند؛ هم‌خطی شدید موجب افزایش واریانس ضرایب تخمینی می‌شود و مقادیر تخمینی نسبت به تغییرات کوچک در مدل حساس می‌شود (Jaccard and Turrisi, 2003). این امر موجب ناپایداری ضرایب تخمینی و پیچیدگی تفسیر آن‌ها خواهد شد (Montgomery et al., 2015). علاوه بر این قابلیت تعمیم مدل تخمین‌گر را کاهش خواهد داد. مشکل دیگری که هم‌خطی ایجاد می‌کند مقادیر گمراه‌کننده سطح معنی‌داری^۱ می‌باشد، زیرا با وجود اهمیت متغیر، مقدار سطح معنی‌داری آن بالا خواهد بود (Paul, 2006).

یکی از دلایل وجود هم‌خطی تعدد زیاد پارامترهای مورد بررسی در رگرسیون چند متغیره می‌باشد (Paul, 2006). از طرفی محاسبه یک ویژگی از سایر ویژگی‌های مورد مطالعه احتمال وجود هم‌خطی را به شدت افزایش می‌دهد. اولین و اساسی‌ترین قدم در کاهش و یا حذف اثر هم‌خطی، تشخیص وجود هم‌خطی و تعیین متغیرهای دارای هم‌خطی است.

روش‌های زیادی برای تشخیص وجود هم‌خطی در بین متغیرهای مورد بررسی وجود دارد. استفاده از روش‌هایی مانند تحلیل مؤلفه اساسی^۲ و تحلیل مؤلفه مستقل^۳ به منظور حذف و یا کاهش هم‌خطی منجر به ایجاد داده‌هایی تغییر ماهیت داده شده می‌شود که نمی‌توان آن‌ها را با مفاهیم فیزیکی مربوط به سنگ و دکل حفاری تعریف نمود. از اینرو؛ در اینجا از روش ماتریس ضرایب همبستگی استفاده خواهد شد. روش ماتریس ضرایب همبستگی به گونه‌ای بر روی داده‌ها اعمال خواهد شد که به نتایج حاصل از روش تحلیل مؤلفه اساسی و مستقل نزدیک باشد. بدین منظور ضریب همبستگی بین هر پارامتر و سایر پارامترها محاسبه، و ماتریس ضرایب تشکیل خواهد شد. سپس به منظور کاهش هم-

¹ *p*-value

² Principle Component Analysis (PCA)

³ Independent Component Analysis (ICA)

خطی، از بین دو پارامتری که از نظر قدرمطلق، ضریب همبستگی بالایی دارند (بیشتر از ۰/۹) یکی از آن‌ها که رابطه ضعیفی با نرخ حفاری دارد از ادامه مطالعات کنار گذاشته خواهد شد.

در جدول ۵-۱۱ ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه AZA ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود همبستگی بالایی بین کندی موج فشاری و برشی وجود دارد. با توجه به ارتباط ضعیف کندی موج برشی با نرخ حفاری، این پارامتر از ادامه مطالعات حذف شد. هرچند همبستگی خوبی بین سایر پارامترها وجود دارد؛ ولی بررسی‌ها نشان می‌دهد که این هم‌خطی‌ها مشکلی در مدل تخمین‌گر ایجاد نمی‌کند.

ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی سایر چاه‌ها در بخش پیوست ارائه شده است (جدول ۹-۱ برای چاه KrA، جدول ۹-۱۲ برای چاه RSA و جدول ۹-۲۳ برای چاه RSB). تحلیل‌های انجام شده در این بخش برای ماتریس ضرایب همبستگی این چاه‌ها نیز انجام شد.

جدول ۵-۱۱. ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه AZA (مقادیر همبستگی‌های شدید پررنگ شده‌اند)

	Depth								
Depth	۱/۰۰	Cal							
Cal	-۰/۳۹	۱/۰۰	RT						
RT	-۰/۲۹	-۰/۰۷	۱/۰۰	GR					
GR	۰/۲۸	۰/۲۲	-۰/۲۸	۱/۰۰	RHOB				
RHOB	-۰/۰۹	-۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۳۱	۱/۰۰	NPHI			
NPHI	۰/۳۷	۰/۰۸	-۰/۲۳	۰/۳۹	-۰/۵۱	۱/۰۰	DTCO		
DTCO	۰/۳۷	-۰/۰۵	-۰/۳۲	۰/۱۹	-۰/۸۲	۰/۷۵	۱/۰۰	DTSM	
DTSM	۰/۳۸	۰/۰۱	-۰/۳۵	۰/۳۲	-۰/۷۲	۰/۷۸	۰/۹۶	۱/۰۰	

در جدول ۵-۱۲ ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه AZA نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود هم‌خطی شدیدی بین ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ وجود دارد. از اینرو؛ پارامترهای ضریب پواسون، حجم شیل، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت فشاری محصور شده و فشار منفذی برای ادامه مطالعات انتخاب شدند.

ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ سایر چاه‌ها در بخش پیوست اشاره شده است (جدول ۹-۲ برای چاه KrA، جدول ۹-۱۳ برای چاه RSA و جدول ۹-۲۴ برای چاه RSB). تحلیل‌های انجام شده در این بخش بر روی ماتریس ضرایب این چاه‌ها نیز انجام شد.

جدول ۵-۱۲. ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه AZA (همبستگی‌های شدید پررنگ شدند)

	E																		
E	۱/۰۰	ν																	
ν	۰/۳۱	۱/۰۰	G																
G	۱/۰۰	۰/۲۶	۱/۰۰	K															
K	۰/۹۸	۰/۵۰	۰/۹۶	۱/۰۰	λ														
λ	۰/۹۵	۰/۵۸	۰/۹۳	۰/۹۹	۱/۰۰	V_{Sh}													
V_{Sh}	-۰/۲۰	۰/۳۷	-۰/۲۱	-۰/۱۱	-۰/۰۷	۱/۰۰	ϕ												
ϕ	۰/۴۳	-۰/۲۱	۰/۴۵	۰/۳۷	۰/۳۳	-۰/۰۷	۱/۰۰	UCS											
UCS	۱/۰۰	۰/۳۱	۱/۰۰	۰/۹۸	۰/۹۵	-۰/۲۰	۰/۴۳	۱/۰۰	TS										
TS	۰/۹۸	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۸۸	-۰/۲۱	۰/۴۶	۰/۹۸	۱/۰۰	CCS									
CCS	۰/۹۳	۰/۴۱	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۲	-۰/۰۱	۰/۳۸	۰/۹۳	۰/۹۱	۱/۰۰	PP								
PP	-۰/۴۰	۰	-۰/۴۱	-۰/۳۷	-۰/۳۵	۰/۲۶	-۰/۲۷	-۰/۴۰	-۰/۴۲	۰/۳۰	۱/۰۰								

در جدول ۵-۱۳ ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه AZA ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود خواص سیال حفاری همبستگی شدیدی با یکدیگر دارند. از اینرو، گرانروی گل که ارتباط خوبی با نرخ نفوذ دارد در ادامه مطالعات استفاده خواهد شد. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی سایر چاه‌ها در بخش پیوست ارائه شده است (جدول ۳-۹ برای چاه KzA، جدول ۹-۱۴ برای چاه RSA و جدول ۹-۲۵ برای چاه RSB). برای تشخیص هم‌خطی در این چاه‌ها نیز تحلیل‌های لازم انجام شد.

جدول ۵-۱۳. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه AZA (مقادیر همبستگی شدید پررنگ شده‌اند)

	MV																		
MV	۱/۰۰	MPV																	
MPV	۰/۹۸	۱/۰۰	MYP																
MYP	۰/۹۹	۰/۹۹	۱/۰۰	SC															
SC	۰/۹۵	۰/۹۸	۰/۹۷	۱/۰۰	MWR														
MWR	-۰/۹۲	-۰/۹۵	-۰/۹۵	-۰/۹۹	۱/۰۰	MO													
MO	۰/۹۰	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۷	-۱/۰۰	۱/۰۰	ECD												
ECD	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۴۶	۰/۴۸	-۰/۴۴	۰/۴۲	۱/۰۰	CT											
CT	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۴۶	۰/۵۳	-۰/۵۶	۰/۵۴	۰/۲۷	۱/۰۰	WOB										
WOB	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۵۰	-۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۲۳	۰/۳۸	۱/۰۰	RPM									
RPM	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۷۲	-۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۲۳	۱/۰۰	PuP								
PuP	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۵۸	۰/۶۳	-۰/۶۲	۰/۶۱	۰/۳۳	۰/۴۴	۰/۵۸	۰/۴۶	۱/۰۰	MD							
MD	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۴۵	۰/۴۸	-۰/۴۴	۰/۴۲	۱/۰۰	۰/۲۷	۰/۲۳	۰/۲۹	۰/۳۲	۱/۰۰	FR						
FR	-۰/۶۵	-۰/۶۳	-۰/۶۷	-۰/۵۲	۰/۵۰	-۰/۴۹	-۰/۲۰	-۰/۲۲	۰/۰۳	-۰/۸۶	-۰/۰۴	-۰/۲۱	۱/۰۰						

۵-۸. انتخاب ویژگی

انتخاب ویژگی به عنوان یک راهکار پردازش داده، روشی موثر و کارا در آماده‌سازی داده‌هایی با ابعاد بزرگ برای تحلیل‌های آماری و یادگیری ماشینی می‌باشد (Li et al., 2016). انتخاب ویژگی از زیر مجموعه روش‌های کاهش ابعاد می‌باشد که در آن از P عضو ویژگی، d عضو ویژگی موثرتر در تخمین یا کلاسه‌بندی انتخاب می‌شوند ($d < P$). انتخاب ویژگی به چهار دلیل اهمیت بسزایی دارد: (۱) همیشه در نظر گرفتن همه ویژگی‌ها منجر به کمینه‌سازی خطای مدل طبقه‌بند یا تخمین‌گر نمی‌شود.^۱ (۲) انتخاب ویژگی موجب کاهش حجم محاسبات و در نتیجه افزایش سرعت پردازش داده می‌شود. (۳) استفاده از همه ویژگی‌ها نیازمند استفاده از فضای بزرگی از حافظه است. (۴) استفاده از همه ویژگی‌ها منجر به بیش‌برازش^۲ مدل تخمین‌گر یا طبقه‌بند خواهد شد.

قبل از انتخاب پارامترهای موثرتر در تخمین نرخ نفوذ، پارامترهای نامناسب بایستی از میان پارامترهای ورودی حذف شوند. برای شناسایی پارامترهای نامناسب در تخمین نرخ نفوذ از سطح معنی‌داری استفاده می‌شود. با استفاده از سطح معنی‌داری می‌توان تنها پارامترهای نامناسب را شناسایی نمود و تشخیص بهترین پارامترهای تأثیرگذار در تخمین پارامتر هدف با استفاده از آن امکان پذیر نمی‌باشد. در این روش پارامترهایی با سطح معنی‌داری بیشتر از ۰/۰۵ به عنوان

¹ Peaking phenomenon

² Over-fitting

پارامترهای نامناسب شناخته می‌شوند. برای نیل به این هدف از آزمون تی-استیودنت دو نمونه‌ای^۱ برای ارزیابی رابطه هر پارامتر مورد مطالعه با نرخ نفوذ استفاده شد. مقادیر سطح معنی داری محاسبه شده برای تمامی نگارهای پتروفیزیکی در همه چاه‌های مورد مطالعه کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. این مطلب بیانگر آن است که هیچ یک از نگارهای پتروفیزیکی را نمی‌توان به عنوان پارامتر نامناسب شناخت. سطح معنی داری برای ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ نیز محاسبه شد و مشاهده گردید که مقادیر آن برای تمامی این پارامترها در همه چاه‌های مورد مطالعه کمتر از ۰/۰۵ است. در ادامه مقادیر سطح معنی داری برای پارامترهای عملیاتی مورد بررسی نیز محاسبه شد. نتایج حاصل از این محاسبه نشان داد که بین هریک از این پارامترها و نرخ نفوذ رابطه معناداری وجود دارد. این روش بر روی تمامی پایگاه‌های داده در سطح اول پیاده شد و مشخص شد که رابطه معناداری بین هر یک از پارامترهای ورودی مدل تخمین‌گر و نرخ نفوذ در چاه‌های مورد مطالعه وجود دارد.

برای انتخاب ویژگی از میان پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ، روش جستجوی افزودن l ، حذف r بکار برده شد. این روش، ترکیبی از دو روش جستجوی مستقیم ترتیبی^۳ و جستجوی معکوس ترتیبی^۴ است. اما محدودیت‌های مربوط به این دو سیستم، یعنی ثابت نگه داشتن ویژگی‌های انتخاب (یا حذف) شده را ندارد. در روش جستجوی افزودن l ، حذف r در صورتی که مقدار l بزرگتر از r باشد؛ حالت جستجوی مستقیم ترتیبی بر جستجوی معکوس ترتیبی غلبه می‌کند و در صورتی که r بزرگتر از l باشد حالت جستجوی معکوس ترتیبی بر حالت جستجوی مستقیم ترتیبی غالب خواهد بود. مکانیزم این روش در حالت غلبه جستجوی مستقیم ترتیبی بدین گونه می‌باشد که ابتدا l عضو، به ترتیب اولویت در معیار انتخاب، یک به یک به مجموعه انتخابی اضافه می‌شوند. سپس r عضو، براساس کمترین تأثیر در معیار انتخاب، از مجموعه انتخابی حذف می‌شوند. این روند تا زمانی ادامه دارد که تعداد ویژگی‌های انتخاب شده به حد خود برسد. در حالت غلبه جستجوی معکوس ترتیبی، عکس این عمل رخ می‌دهد. یعنی ابتدا همه ویژگی‌ها به عنوان ویژگی‌های انتخابی در نظر گرفته می‌شوند و سپس ویژگی‌هایی که کمترین تأثیر را دارند در هر مرحله از تکرار الگوریتم، از مجموعه انتخابی حذف می‌شوند. براین اساس، سرعت عمل این حالت نسبت به حالت جستجوی مستقیم ترتیبی کمتر خواهد بود. لذا در این مقاله برای انتخاب ویژگی از حالت غلبه جستجوی مستقیم ترتیبی روش افزودن l ، حذف r استفاده خواهد شد. از اینرو؛ مقدار l و r به ترتیب برابر ۳ و ۲ در نظر گرفته شد. بدین ترتیب در هر گام این روش تنها یک ویژگی به ویژگی‌های انتخاب شده اضافه خواهد شد تا تأثیر افزودن هر

¹ Two sample t-test

² Plus-1 take-r search method

³ Sequential Forward Selection (SFS)

⁴ Sequential Backward Selection (SBS)

یک از ویژگی‌ها در مدل تخمین‌گر ارزیابی شود. در جدول ۵-۱۴ شبه کد الگوریتم افزودن l حذف r در حالت غلبه جستجوی مستقیم ترتیبی نشان داده شده است. برای ارزیابی ویژگی‌های انتخاب شده براساس ریشه میانگین مربعات خطای تخمین، از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده شد (رابطه ۴-۸). از آنجایی که داده‌ها به دو دسته آموزش (۷۰ درصد کل داده‌ها) و آزمون (۳۰ درصد کل داده‌ها) تقسیم شده‌اند، دو مقدار برای خطا و ضریب تعیین به ازای هر بار اجرای شبکه عصبی وجود خواهد داشت. به منظور اختیار یک مقدار خطا و ضریب تعیین برای مدل، به ازای هر انتخاب ویژگی، به ترتیب از روابط ۴-۶ و ۴-۷ استفاده شد. برای جلوگیری از بیش‌یادگیری مدل، وزن آموزش (W_{Train}) و آزمون (W_{Test}) در این روابط به ترتیب برابر با ۰/۴۵ و ۰/۵۵ در نظر گرفته شد. شبکه عصبی پرسپترون چند لایه به کار برده شده متشکل از سه لایه پنهان است که به ترتیب دارای ۵، ۵ و ۴ نرون در لایه‌های اول تا سوم است. تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌ها در هر لایه براساس روش آزمون و خطا تعیین شد. آموزش شبکه عصبی با الگوریتم لونیگ-مارکوت^۱، که یکی از موفق‌ترین الگوریتم‌ها در افزایش سرعت همگرایی در شبکه عصبی مصنوعی با ساختار چند لایه است (Hagan and Menhaj, 1994)، صورت گرفت. به دلیل انتخاب تصادفی بایاس و وزن‌های اولیه مدل شبکه عصبی، در هر بار اجرای این الگوریتم جواب‌های متفاوتی بدست می‌آید. برای جلوگیری از این عمل، در هر انتخاب ویژگی، شبکه عصبی ده بار اجرا خواهد شد و از میان ده خطا، میانگین سه خطای کمتر به عنوان خطای مدل برای ویژگی مورد ارزیابی در نظر گرفته خواهد شد.

¹ Levenberg-Marquardt

جدول ۵-۱۴. شبه کد الگوریتم جستجوی افزودن l ، حذف r در حالت غلبه جستجوی مستقیم ترتیبی

<p>۱- مقدار دهی اولیه : تعداد ویژگی‌های انتخابی (d) مد نظر مشخص شود، مجموعه انتخابی برابر تهی در نظر گرفته شود، بهترین خطا ($Best_RMSE$) برابر مثبت بی‌نهایت در نظر گرفته شود، مقدار l و r تعیین شود.</p> <p>۲- مراحل این بخش تا زمانی که تعداد اعضای مجموعه کمتر از d باشد تکرار شود.</p> <p>۱-۲- برای $i=1$ to l</p> <p>۱-۱-۲- برای z از ۱ تا تعداد ویژگی‌های موجود</p> <p>۱-۱-۲- ویژگی z را به مجموعه انتخابی اضافه شود</p> <p>۲-۱-۲- مجموعه انتخابی با شبکه عصبی ارزیابی شود.</p> <p>۳-۱-۲- در صورتی که $RMSE$ حاصل از ارزیابی کمتر از $Best_RMSE$ باشد $RMSE$ حاصل به عنوان $Best_RMSE$ جایگزین شود و اندیس ویژگی مرتبط ذخیره شود. در غیراینصورت به گام بعدی برود.</p> <p>۴-۱-۲- ویژگی از مجموعه انتخابی حذف و به z یکی اضافه شود.</p> <p>۲-۱-۲- ویژگی مربوط به اندیس ذخیره شده در گام ۳-۱-۲ به مجموعه انتخابی اضافه شود و به مقدار i یکی اضافه شود.</p> <p>۲-۲- مقدار $Best_RMSE$ برابر با مثبت بی‌نهایت در نظر گرفته شود.</p> <p>۳-۲- برای i از ۱ تا r</p> <p>۱-۳-۲- برای z از ۱ تا l</p> <p>۱-۳-۲- سایر ویژگی‌های مجموعه انتخابی به غیر از ویژگی z به عنوان زیر مجموعه انتخابی در نظر گرفته شود.</p> <p>۲-۱-۳-۲- زیرمجموعه انتخابی با شبکه عصبی ارزیابی شود.</p> <p>۳-۱-۳-۲- در صورتی که $RMSE$ حاصل از شبکه عصبی کمتر از $Best_RMSE$ باشد مقدار $RMSE$ در $Best_RMSE$ جایگزین شود و اندیس ویژگی (j) ذخیره شود. در غیراینصورت به گام بعدی برود.</p> <p>۴-۱-۳-۲- به z یکی اضافه کند.</p> <p>۲-۴-۲- اندیس ذخیره شده از مجموعه انتخابی حذف شود و $Best_RMSE$ برابر مثبت بی‌نهایت در نظر گرفته شود.</p>
--

در جدول ۵-۱۵ بهترین ترکیب پارامترهای انتخاب شده براساس روش انتخاب ویژگی برای مدل‌سازی نرخ نفوذ ارائه شده است. با توجه به اینکه در پایگاه شماره یک سطح اول همه چاه‌ها، روند افزایش دقت از تعداد ۵ پارامتر ورودی به بعد بسیار ناچیز است؛ بنابراین، این تعداد برای مدل‌سازی نرخ حفاری با روش‌های رگرسیونی و شبکه عصبی در فصل بعد انتخاب شدند. برای قضاوت در شرایط برابر بین پایگاه‌های مختلف سطح اول داده، برای سایر پایگاه‌های این سطح (یعنی پایگاه شماره ۲ و ۳) نیز تعداد پارامترهای انتخابی برابر ۵ در نظر گرفته شد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود دقت مدل‌های دربرگیرنده پارامترهای سنگ هر چاه نسبت به مدل‌های مربوط به پایگاه شماره ۱ چاه متناظر بیشتر است. از اینرو؛ می‌توان گفت که اضافه نمودن پارامترهای سنگ موجب افزایش دقت مدل تخمین‌گر نرخ حفاری می‌شود. البته این مقدار افزایش در زمان افزایش ویژگی ژئومکانیکی سنگ نسبت به نگار پتروفیزیکی بیشتر است و دلیل آن می‌تواند ناشی بار اطلاعاتی بیشتر پارامتر ژئومکانیکی نسبت به یک نگار پتروفیزیکی باشد. پارامترهای سنگ به عنوان ویژگی چهارم یا پنجم انتخاب شده در روش جستجوی افزودن l ، حذف r به مدل‌های نرخ حفاری اضافه می‌شوند. این پدیده گویای دو مطلب است؛ که این ویژگی‌ها نمی‌توانند به تنهایی بیان‌کننده قابلیت حفاری سازند باشند و ارزش آن‌ها به تنهایی نسبت به ارزش پارامترهای عملیاتی پایین‌تر است. پارامتر مقاومت فشاری

محصور شده سنگ نشان داد که نسبت به سایر پارامترهای سنگ ارتباط بهتری را با نرخ نفوذ نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۵. ویژگی‌های انتخاب شده برای تخمین نرخ نفوذ با استفاده از روش جستجوی افزودن l حذف r برای سطح اول پایگاه‌های داده

شماره پایگاه داده	نام پایه	تعداد پارامترهای انتخاب شده	نام پارامترها	RMSE	R-Square
۱	AzA	۵	CT, WOB, RPM, PuP, FR	۰/۲۴۶	۰/۴۶۲
	KrA	۵	CT, WOB, RPM, Tor, PuP	۰/۱۴۳	۰/۷۹۹
	RSA	۵	MYP, WOB, RPM, Tor, PuP	۰/۱۹۱	۰/۵۲۷
	RSB	۵	ECD, WOB, Tor, PuP, FR	۰/۰۷۷	۰/۷۴۳
۲	AzA	۵	CT, WOB, RPM, DTCO, FR	۰/۱۸۱	۰/۵۳۲
	KrA	۵	DTCO, ECD, WOB, RPM, FR	۰/۱۱۷	۰/۸۵۲
	RSA	۵	Depth, DTCO, MYP, WOB, RPM	۰/۱۷۳	۰/۵۵۶
	RSB	۵	DTCO, ECD, Tor, PuP, FR	۰/۰۶۷	۰/۷۷۳
۳	AzA	۵	ϕ , CCS, CT, RPM, FR	۰/۱۶۳	۰/۵۶۹
	KrA	۵	CCS, ECD, RPM, PuP, FR	۰/۱۰۹	۰/۸۷۰
	RSA	۵	CCS, MYP, ECD, WOB, RPM	۰/۱۶۴	۰/۵۸۱
	RSB	۵	CCS, ECD, Tor, PuP, FR	۰/۰۶۵	۰/۷۹۱

۵-۹. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل به منظور افزایش کیفیت داده‌های مورد بررسی، پیش‌پردازش روی داده‌ها اعمال شد. ابتدا همسان‌سازی مقیاس منابع اطلاعاتی مختلف با استفاده از روش بزرگ‌نمایی مقیاس داده‌ها انجام شد. سپس پایگاه‌های داده مختلف در دو سطح ایجاد شد. سطح اول پایگاه داده به منظور ارزیابی تأثیر ویژگی‌های سنگ متشکل از سه پایگاه داده مختلف می‌باشد. در این سطح، در پایگاه اول تنها پارامترهای عملیاتی، در پایگاه دوم علاوه بر پارامترهای عملیاتی، نگارهای پتروفیزیکی و در پایگاه سوم پارامترهای عملیاتی و ویژگی‌های ژئومکانیکی قرار دارند. سطح دوم پایگاه داده بعد از انجام آزمایش نفوذگر و با استفاده از پارامترهای عملیاتی و شاخص‌های مختلف استخراجی از نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌ها تشکیل خواهد شد. در ادامه به منظور تشخیص نوفه در داده‌ها، تحلیل طیفی و همبستگی خودکار روی داده‌های هر منبع اطلاعاتی مختلف پیاده شد. نتایج ارزیابی تحلیل‌های صورت گرفته نشان از وجود نوفه در داده‌ها است. شدت نوفه در نگارهای پتروفیزیکی و ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ نسبت به پارامترهای عملیاتی بیشتر می‌باشد. در ادامه به منظور کاهش نوفه در داده‌ها، از صافی

هموارساز ساویتزکی-گولایی استفاده شد. در پایان، برای انتخاب بهترین ویژگی‌های تأثیرگذار روی نرخ نفوذ، ابتدا مقادیر سطح معنی‌داری برای حذف پارامترهای نامناسب ارزیابی شد، سپس از روش جستجوی افزودن 1، حذف 2 همراه با شبکه عصبی پرسپترون چند لایه برای انتخاب ویژگی‌های برتر استفاده شد. نتایج انتخاب ویژگی نشان داد که با افزایش تعداد ورودی‌ها دقت و ضریب همبستگی مدل‌های تخمین‌گر افزایش می‌یابد ولی این افزایش از یک تعداد ورودی به بعد بسیار ناچیز است. در پایگاه شماره 1 سطح اول هر چاه، تعداد پارامترهای انتخاب شده برای مدل‌سازی نرخ حفاری برابر با 5 می‌باشد. از اینرو؛ برای قضاوت در شرایط برابر میان مدل‌های تخمین‌گر نرخ نفوذ پایگاه‌های داده مختلف هر چاه، تعداد پارامترهای انتخاب شده برای همه چاه‌های مورد مطالعه برابر 5 در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل روش انتخاب ویژگی نشان داد که پارامترهای سنگ به عنوان انتخاب‌های چهارم و یا پنجم در مدل تخمین‌گر نرخ نفوذ وارد می‌شوند.

فصل ششم: بررسی تأثیر پارامترهای سنگ بر نرخ حفاری با
استفاده از مدل سازی نرخ نفوذ

۶-۱. مقدمه

وجود پارامترهای بی‌شماری که توأمان روی سرعت حفاری تأثیر می‌گذارند؛ مدل‌سازی نرخ نفوذ را بسیار دشوار ساخته است. از اینرو؛ استفاده از روش‌های رگرسیون چند متغیره می‌تواند تا اندازه‌ای این مشکل را کاهش دهد. هرچند مشاهده شده است که در اکثر مطالعات موردی، وجود روابط غیرخطی پیچیده بین پارامترهای تأثیرگذار و نرخ نفوذ، دقت و اعتبار نتایج حاصل از مدل‌های آماری و ریاضی را کاسته است. روش‌های هوش مصنوعی، به دلیل برخورداری از ساختار غیرخطی پیچیده (Liao and Yu, 2008; Vidyasagar, 2002)، نتایج بهتری را در حل مشکلات صنعت نشان داده‌اند. بنابراین، این روش‌ها می‌توانند گزینه مناسب‌تری نسبت به روش‌های رگرسیونی باشند. اما یکی از محدودیت‌های این روش‌ها نسبت به روش رگرسیونی، عدم درک کاربر از چگونگی تعامل متغیرهای پیش‌بینی‌کننده با پارامتر هدف است. از اینرو؛ در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی نرخ نفوذ از روش‌های تحلیل رگرسیونی چند متغیره و هوش مصنوعی بهره برده خواهد شد. اما ابتدا از روش رگرسیون دو متغیره برای ارزیابی رابطه هر یک از پارامترهای تأثیرگذار با نرخ نفوذ استفاده خواهد شد.

۶-۲. تحلیل رگرسیونی

تحلیل رگرسیونی، فن و تکنیکی آماری برای بررسی و مدل‌سازی ارتباط بین متغیر وابسته و متغیر مستقل بوده و هدف آن پیش‌بینی متغیر وابسته از روی متغیر و یا متغیرهای مستقل می‌باشد. با توجه به این که متغیرها می‌توانند دارای روابطی با یکدیگر باشند با استفاده از مباحث مدل‌سازی و رگرسیون می‌توان روابط آن‌ها را یافته و مورد ارزیابی قرار داد. تحلیل رگرسیونی دارای روش‌های متعددی است که در این بخش از دو روش رگرسیون دو متغیره و چند متغیره غیرخطی برای مدل‌سازی نرخ نفوذ از پارامترهای انتخاب شده در بخش ۵-۸ استفاده می‌شود.

۶-۲-۱. رگرسیون دو متغیره

بررسی رابطه هر متغیر پیش‌بینی‌کننده با متغیر هدف می‌تواند گویای چگونگی ارتباط پارامتر مستقل با پارامتر وابسته باشد و همچنین می‌تواند وزن اهمیت پارامتر مستقل را در برآورد پارامتر هدف تعیین کند. برای ارزیابی رابطه هر متغیر پیش‌بینی‌کننده با نرخ نفوذ به صورت جداگانه، پنج تابع مختلف شامل تابع چند جمله‌ای از درجه اول (خطی)، تابع چند جمله‌ای از درجه دوم (سه‌می)، تابع نمایی،

تابع لگاریتم طبیعی و تابع توانی، در نظر گرفته شد. در ادامه روابط هر یک از پارامترها با نرخ نفوذ به تفکیک منابع اطلاعاتی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۶-۲-۱-۱. نگارهای پتروفیزیکی

در جدول ۶-۱ بهترین رابطه هر یک از نگارهای پتروفیزیکی با نرخ نفوذ در چاه AZA نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نگارهای عمق، تخلخل و کندی موج برشی به صورت سهمی ارتباط خوبی را با نرخ نفوذ در این چاه نشان داده است. با کمی تأمل در این روابط می‌توان دریافت که برخی مقادیر این پارامترها در این روابط موجب ایجاد نرخ نفوذی با مقدار منفی می‌شود. به عنوان نمونه اگر مقدار نرخ نفوذ با استفاده از این رابطه برای عمق ۲۵۶۵ متری محاسبه شود؛ مقدار نرخ نفوذ برابر $0/067-$ بدست خواهد آمد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این رابطه برای عمق‌های با مقدار کمتر از ۲۵۶۷ متر، مقدار نرخ نفوذ را منفی محاسبه می‌نماید. همچنین مشاهده می‌شود که این رابطه برای عمق‌های با مقدار بیشتر از ۳۱۳۰ متر، نرخ نفوذ را منفی محاسبه می‌کند. رابطه خطی بین چگالی و نرخ نفوذ نیز همانند رابطه سهمی می‌تواند منجر به نتایج غیرمنطقی نرخ نفوذ شود. به عنوان نمونه دولومیت‌ها دارای مقدار چگالی $2/8$ تا $3/1$ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند (Schön, 2011). در صورتی که این رابطه برای این سنگ استفاده شود، مشاهده می‌شود که مقدار چگالی ۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب منجر به نرخ نفوذی با مقدار $0/05-$ می‌شود که این مقدار نرخ حفاری غیرمنطقی است. همان‌طور که مشاهده شد استفاده از این روابط در چاه‌های دیگر می‌تواند منجر به ایجاد نتایج غیرمنطقی شود. از اینرو؛ نمی‌توان این روابط را به عنوان رابطه کلی بین این پارامترها و نرخ نفوذ در نظر گرفت. در صورتی که از این روابط (سهمی و خطی) برای این پارامترها صرف نظر شود، رابطه‌نمایی می‌تواند به خوبی ارتباط این پارامترهای را با نرخ نفوذ نشان دهد. ارزیابی روابط جدول ۶-۱ بیان می‌دارد که مقاومت ویژه سازند، تابش گاما و چگالی رابطه معکوس و کندی موج فشاری رابطه مستقیم با نرخ نفوذ دارند. این در حالی است که با در نظر گرفتن رابطه سهمی بین پارامترهای عمق، تخلخل و کندی موج برشی با نرخ نفوذ، افزایش مقادیر آن‌ها ابتدا موجب افزایش نرخ نفوذ و سپس موجب کاهش نرخ نفوذ می‌شود. این یافته با نتایج تحقیقات قبلی سازگاری ندارد. چرا که افزایش تخلخل و کندی موج برشی موجب افزایش نرخ نفوذ و افزایش عمق موجب کاهش آن می‌شود. این نتایج در رابطه‌نمایی این پارامترها با نرخ نفوذ قابل مشاهده است. از اینرو؛ رابطه‌نمایی برای رابطه آن‌ها با نرخ نفوذ توصیه می‌شود. بررسی نوع سازند در هر چاه نشان داد که تأثیر محسوسی روی نرخ نفوذ تخمینی ندارد. از اینرو؛ در مدل‌سازی رگرسیونی چند متغیره و شبکه عصبی تأثیر نوع سازند بررسی نخواهد شد. بهترین رابطه برازش شده بین هر یک از نگارهای پتروفیزیکی با نرخ نفوذ برای سایر چاه-

ها در بخش پیوست ارائه شده است (جدول ۹-۴ برای چاه KrA، جدول ۹-۱۵ برای چاه RSA و جدول ۹-۲۶ برای چاه RSB). تحلیل‌های انجام شده در این بخش برای روابط بین نگارهای پتروفیزیکی و نرخ نفوذ سایر چاه‌ها نیز انجام گرفت.

جدول ۶-۱. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و نگارهای پتروفیزیکی چاه AZA

نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
عمق	$ROP = -0.000097 \times Depth^2 + 0.5526 \times Depth - 779.3017$	۰/۲۹۳	۰/۷۸۹
مقاومت ویژه	$ROP = 6.1504 \times RT^{-0.15969}$	۰/۱۴۸	۳/۰۶۳
گاما	$ROP = 15.7186 \times GR^{-0.29186}$	۰/۰۸۱	۳/۱۲۰
تخلخل	$ROP = -0.116.14 \times NPFI^2 + 53.9339 \times NPFI - 0.25314$	۰/۰۵۱	۳/۲۳۲
چگالی	$ROP = -9.995 \times RHOB + 29.9338$	۰/۲۰۱	۲/۹۶۶
کندی موج فشاری	$ROP = 0.8891 \times e^{0.02365 \times DTCO}$	۰/۱۴۹	۳/۰۶۱
کندی موج برشی	$ROP = -0.00084 \times DTSM^2 + 0.28338 \times DTSM - 17.3941$	۰/۰۹۷	۳/۱۵۲

۶-۲-۱-۲. ویژگی‌های سنگ

بهترین روابط برازش شده بین ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ و نرخ نفوذ در جدول ۶-۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود تنها رابطه فشار منفذی با نرخ نفوذ به صورت سهمی می‌باشد. بررسی این رابطه برای برخی مقادیر فشار منفذی منجر به نتایج غیرمنطقی (مقادیر منفی) نرخ نفوذ می‌شود. از اینرو؛ استفاده از این رابطه به عنوان یک قانون کلی فشار منفذی و نرخ نفوذ توصیه نمی‌شود. از طرفی، تحقیقات قبلی نشان داده‌اند؛ که با افزایش فشار منفذی، نرخ نفوذ نیز افزایش می‌یابد. دلیل این امر آن است که افزایش فشار منفذی منجر به کاهش فشار موثر و در نتیجه موجب کاهش مقاومت سنگ می‌شود (Fertl, 1976). افزایش ضریب پواسون، حجم شیل و مقاومت فشاری محصور شده موجب کاهش نرخ نفوذ حفاری می‌شود. یافته‌های محققان نشان می‌دهد که حفاری شیل نسبت به حفاری سنگ‌های کربناته و ماسه سنگی آهسته‌تر است (Talabani et al., 1993) و همچنین وجود شیل احتمال گلی شدن مته را افزایش می‌دهد. عموماً با افزایش مقاومت فشاری سنگ، نرخ حفاری نیز کاهش می‌یابد و این کاهش به صورت لگاریتم در مبنای عدد طبیعی است (Feng et al., 2013). در جدول ۶-۲ مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، نرخ حفاری نیز افزایش می‌یابد. یافته‌های دقیقی برای ارتباط زاویه اصطکاک داخلی به نرخ نفوذ براساس نتایج داده‌های میدان و یا نتایج آزمایشگاهی وجود ندارد. هر چند محققانی با استفاده از رابطه زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری تک محوری سنگ نشان دادند که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، نرخ حفاری بایستی به صورت لگاریتمی کاهش یابد (Feng et al., 2013).

در صورتی که از رابطه سهمی فشار منفذی با نرخ حفاری در چاه AZA صرف نظر شود، از میان پارامترهای سنگ، مقاومت فشاری محصور شده ارتباط قوی‌تری را با نرخ حفاری نشان می‌دهد. مقاومت فشاری محصور شده، به دلیل لحاظ شرایط چاه، نسبت به مقاومت فشاری تک محوری همبستگی بیشتری را با نرخ نفوذ نشان می‌دهد و می‌تواند بیانگر قابلیت حفاری سنگ باشد (Shi et al., 2015).

بهترین روابط برازش شده بین هر یک از ویژگی‌های سنگ با نرخ حفاری برای سایر چاه‌های مورد مطالعه در بخش پیوست ارائه شده است (جدول ۹-۵ برای چاه KrA، جدول ۹-۱۶ برای چاه RSA و جدول ۹-۲۷ برای چاه RSB). تحلیل‌های صورت گرفته در این بخش برای روابط این چاه‌ها نیز انجام شد.

جدول ۶-۲. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و ویژگی‌های ژئومکانیکی چاه AZA

نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
ضریب پواسون	$ROP = 50.1439 \times e^{-7.7978 \times v}$	۰/۱۱۸	۳/۱۱۵
حجم شیل	$ROP = 4.0244 \times V_{sh}^{-0.17326}$	۰/۰۷۷	۳/۱۸۷
زاویه اصطکاک داخلی	$ROP = 0.87268 \times \phi^{0.5557}$	۰/۰۲۱	۳/۲۸۲
مقاومت فشاری محصور شده	$ROP = 14.4364 \times e^{-0.0115 \times CCS}$	۰/۲۷۲	۲/۸۳۰
فشاری منفذی	$ROP = -1.2464 \times PP^2 + 62.6317 \times PP - 779.2748$	۰/۲۹۳	۲/۷۹۰

۳-۱-۲-۶. پارامترهای گل‌نگاری

در جدول ۶-۳ ارتباط پارامترهای عملیاتی مورد مطالعه با نرخ نفوذ حفاری نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود اکثر پارامترها با نرخ نفوذ بصورت سهمی‌وار ارتباط دارند. بررسی این روابط نشان می‌دهد که در برخی مقادیر این پارامترها، مقدار نرخ حفاری منفی می‌شود. به عنوان نمونه آب دارای گرانیوی یک سانتی‌پواز در ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در صورت جایگذاری این مقدار در رابطه گرانیوی و نرخ نفوذ، مقدار نرخ نفوذ برابر ۱۴/۱۸- متر بر ساعت بدست خواهد آمد؛ که مقداری غیرمنطقی است. این تحلیل در مورد سایر پارامترها نیز انجام و مشخص شد که استفاده از این روابط دارای محدودیت‌هایی است و توسعه آن به عنوان یک قانون کلی برای استفاده در سایر چاه‌ها امکان‌پذیر نیست. از این‌رو رابطه دوم که بهترین دقت و همبستگی را با نرخ نفوذ داشت برای این پارامترها انتخاب شد. رابطه جایگزین برای تمامی این پارامترها به صورت نمایی می‌باشد. سرعت دوران در این چاه نسبت به سایر پارامترهای عملیاتی ارتباط بهتری را با نرخ نفوذ نشان می‌دهد. صرف نظر از روابط سهمی، مشاهده می‌شود که ارتباط مستقیمی بین چگالی معادل در

جریان، سرعت دوران، فشار پمپ و چگالی گل با نرخ نفوذ وجود دارد. این در حالی است که یافته‌های قبلی نشان می‌دهند که چگالی معادل در جریان و چگالی گل به طور معکوس مرتبط با نرخ حفاری است. این تناقض می‌تواند ناشی از غالب بودن اثر سایر پارامترهای تأثیرگذار در نرخ حفاری باشد. به عنوان نمونه در عمقی که به دلیل حفظ پایداری دیواره چاه، چگالی گل افزایش داده شده است؛ ولی همزمان مقادیر پارامترهای قابل کنترل دیگر به گونه‌ای تغییر داده شده است؛ که موجب افزایش سرعت حفاری شوند. رابطه معکوس نرخ جریان با نرخ حفاری در این چاه نیز با سایر تحقیقات قبلی در تناقض است.

جدول ۳-۶. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و پارامترهای عملیاتی چاه AzA

نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
ضریب گرانروی گل	$ROP = -0.0123 \times MV^2 + 1.0275 \times MV - 15.1989$	۰/۰۹۵	۳/۱۵۶
گرانروی پلاستیک گل	$ROP = -0.0565 \times MPV^2 + 1.4655 \times MPV - 0.24405$	۰/۱۸۳	۳/۰۰۰
حد تسلیم گل	$ROP = -0.0793 \times MYP + 1.4563 \times MYP + 0.40693$	۰/۱۲۱	۳/۱۱۱
محتوای جامد گل	$ROP = -0.04934 \times SC^2 + 1.4606 \times SC - 3.198$	۰/۰۹۶	۳/۱۵۴
محتوای آب گل	$ROP = -0.0023 \times MWR^2 + 0.2881 \times MWR - 2.3461$	۰/۱۰۴	۳/۱۴۲
محتوای نفت گل	$ROP = -0.00404 \times MO^2 + 0.1866 \times MO + 4.4006$	۰/۱۰۶	۳/۱۳۷
چگالی معادل در جریان	$ROP = 0.41335 \times e^{0.0362 \times ECD}$	۰/۰۲۰	۳/۲۸۴
ضریب سائیدگی دندان مته	$ROP = -1.4146 \times CT^2 + 5.0164 \times CT + 3.1445$	۰/۲۶۹	۲/۸۳۸
وزن روی متنه	$ROP = -0.007955 \times WOB^2 + 0.2062 \times WOB + 4.4245$	۰/۰۰۷	۳/۳۰۷
سرعت دوران	$ROP = 1.7757 \times e^{0.006585 \times RPM}$	۰/۱۷۳	۳/۰۱۶
گشتاور	-	-	-
فشار پمپ	$ROP = 0.1076 \times PuP^{0.58002}$	۰/۰۱۶	۳/۲۹۰
چگالی گل	$ROP = 0.44911 \times e^{0.036083 \times MD}$	۰/۰۲۰	۳/۲۸۴
نرخ جریان	$ROP = 28.9829 \times e^{-0.004297 \times FR}$	۰/۰۹۴	۳/۱۵۸

بهترین روابط برازش شده بین پارامترهای عملیاتی و نرخ حفاری سایر چاه‌های مورد مطالعه در بخش پیوست اشاره شده است (جدول ۹-۶ برای چاه KtA، جدول ۹-۱۷ برای چاه RSA و جدول ۹-۲۸ برای چاه RSB). تحلیل‌های انجام شده در این بخش برای این چاه‌ها نیز انجام گرفت.

۲-۲-۶. رگرسیون چند متغیره غیرخطی

به منظور تخمین نرخ حفاری، رگرسیون چند متغیره غیرخطی بر روی پارامترهای انتخاب شده در بخش ۵-۸ اعمال شد. بدین منظور علاوه بر این پارامترها، حاصلضرب دوتایی آن‌ها نیز در نظر گرفته

شد. به منظور حصول رابطه‌ای با ضریب همبستگی بالا، دو هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا و حذف مؤلفه‌هایی با سطح معنی‌داری بالای ۵ درصد برای ایجاد رابطه رگرسیونی لحاظ شد. نتیجه اعمال این روش بر روی پایگاه‌های مختلف سطح اول داده در جدول ۶-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود دقت و ضریب همبستگی مدل شماره ۲ و ۳ که علاوه بر پارامترهای عملیاتی به ترتیب در برگیرنده نگار کندی موج فشاری و مقاومت فشاری محصور شده است نسبت به مدل شماره ۱ که تنها در برگیرنده پارامترهای عملیاتی است افزایش یافته است. این در حالی است که تعداد پارامترهای این مدل‌ها با هم برابر می‌باشد. افزایش دقت مدل پیش‌بینی کننده نرخ حفاری با لحاظ ویژگی‌های سنگ نسبت به نگارهای پتروفیزیکی چشمگیرتر بوده است. دلیل این امر را می‌توان در این دانست که مقاومت فشاری محصور شده خود تلفیقی از چندین نگار درون چاهی است و بار اطلاعاتی بیشتری را نسبت به یک نگار پتروفیزیکی با خود به همراه دارد. با توجه به مقایسه انجام شده میان ضرایب همبستگی و خطای مدل‌های مختلف می‌توان با اطمینان گفت که لحاظ ویژگی‌های سنگ منجر به افزایش دقت مدل‌های پیش‌بینی کننده نرخ نفوذ می‌شود.

مدل‌های رگرسیونی حاصل از اعمال رگرسیون چند متغیره غیرخطی بر روی داده‌های سطح اول سایر چاه‌ها در بخش پیوست ارائه شده است (جدول ۹-۷ برای چاه KTA، جدول ۹-۱۸ برای چاه RSA و جدول ۹-۲۹ برای چاه RSB). تحلیل‌های صورت گرفته در این بخش برای مدل‌های حاصل از داده‌های این چاه‌ها نیز انجام شد.

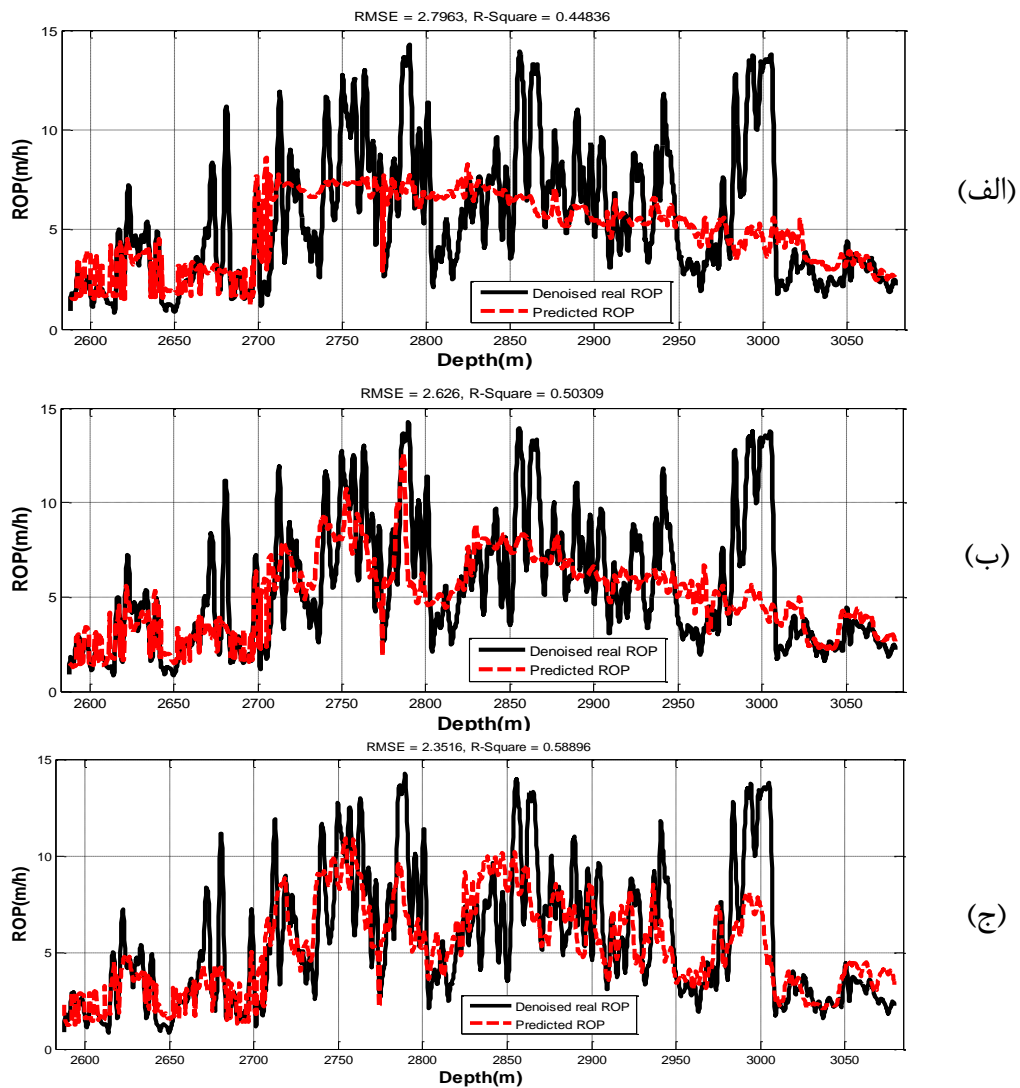
جدول ۶-۴. مدل‌های رگرسیونی حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی روی داده‌های انتخاب شده (مدل ۱: پایگاه داده شماره ۱، مدل ۲: پایگاه داده شماره ۲ و مدل ۳: پایگاه داده شماره ۳)

سطح اول

نام مدل	رابطه	R-Square	RMSE
مدل شماره ۱	$ROP = e^{(-3.1785-0.3495CT-0.0627WOB+0.0267RPM+0.0043PuP+0.0064FR)} \times e^{(CT \times (-0.0127WOB+0.0012RPM-0.00042PuP+0.0012FR))} \times e^{(FR \times (0.0002WOB-5.184 \times 10^{-5}RPM-6.976 \times 10^{-6}PuP))}$	۰/۴۴۸	۲/۷۹۶
مدل شماره ۲	$ROP = e^{(-2.9295+0.0385DTCO-0.0593CT-0.1567WOB+0.0222RPM+0.0066FR)} \times e^{(DTCO \times (0.0008WOB-8.371 \times 10^{-5}FR))} \times e^{(CT \times (-0.0081WOB-0.0005RPM))} \times e^{(FR \times (0.0002WOB-3.149 \times 10^{-5}RPM))}$	۰/۵۰۳	۲/۶۲۶
مدل شماره ۳	$ROP = e^{(3.0855-0.1685\phi-0.0047CCS-0.408CT+0.0231RPM-0.0032FR)} \times e^{(\phi \times (9.18 \times 10^{-5}CCS+0.0136CT+0.00023RPM+0.00032FR))} \times e^{(-0.0013CCS \times CT)} \times e^{(RPM \times (-3.11 \times 10^{-5}CCS-0.0004CT-4.68 \times 10^{-5}FR))}$	۰/۵۸۹	۲/۳۵۲

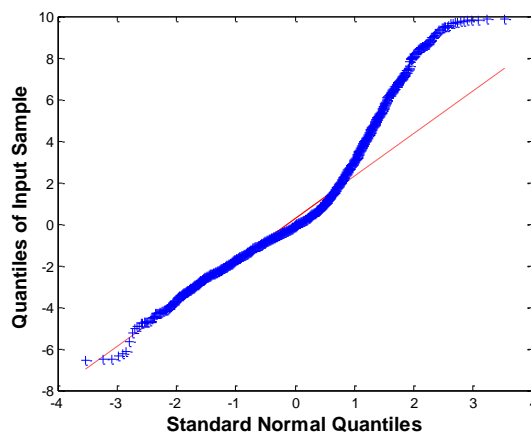
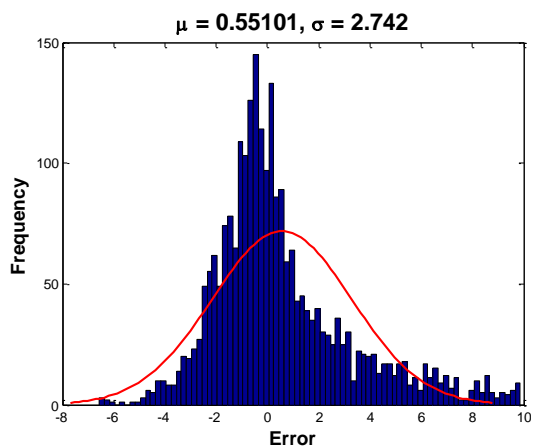
در شکل ۱-۶ مقایسه مقادیر نرخ حفاری نوفه‌زدایی شده و تخمینی با استفاده از روش رگرسیونی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ در صورت استفاده از ویژگی‌های سنگ به خصوص ویژگی‌های ژئومکانیکی، مدل رگرسیونی جزئیات بیشتری را می‌تواند محاسبه نماید. تحلیل خطای باقی‌مانده در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ خطای باقی‌مانده از توزیع نرمال پیروی می‌کند؛ ولی، به سمت راست چولگی دارد.

مقایسه نرخ نفوذ تخمینی و مشاهده‌ای نوفه‌زدایی شده برای سایر چاه‌ها در بخش پیوست ارائه شده است (شکل ۴-۹ برای چاه KfA، شکل ۱۷-۹ برای چاه RSA و شکل ۳۰-۹ برای چاه RSB). تحلیل خطای باقیمانده برای سایر چاه‌ها نیز در ادامه این مدل‌ها در پیوست نشان داده شده است (شکل ۵-۹ برای چاه KfA، شکل ۱۸-۹ برای چاه RSA و شکل ۳۱-۹ برای چاه RSB).

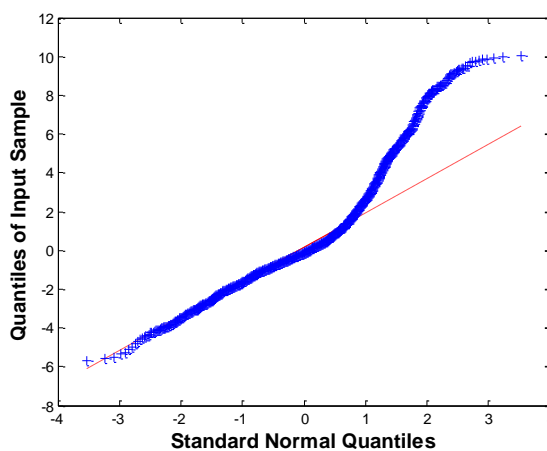
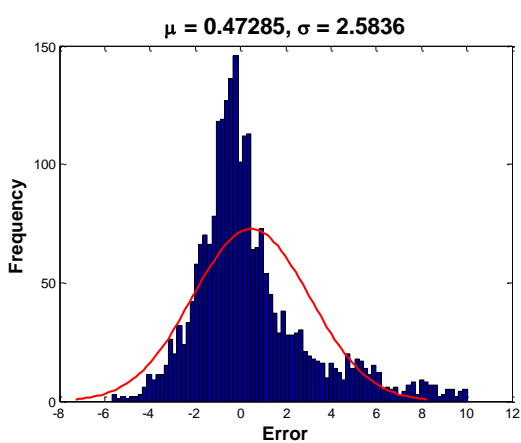


شکل ۱-۶. مقایسه نرخ نفوذ تخمینی در چاه AZA با استفاده از مدل‌های جدول ۴-۶: (الف) مدل شماره ۱،

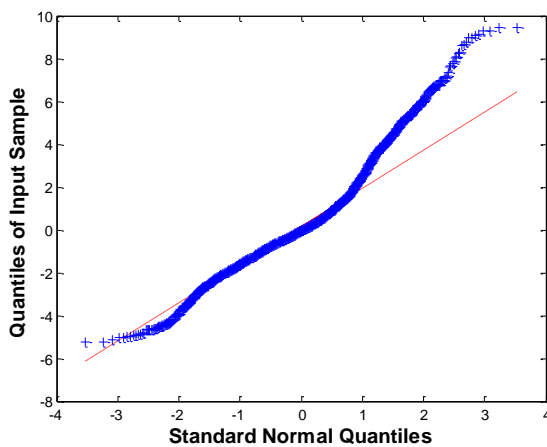
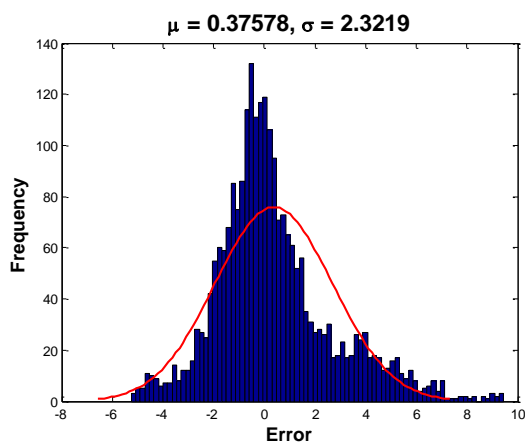
(ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶-۲. تحلیل باقیمانده با استفاده از نمودار Q-Q (شکل‌های سمت راست) و توزیع فراوانی (شکل‌های سمت چپ) برای: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ در چاه AZA

۳-۶. شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی یک نسخه کپی شده از عملکرد نرون‌های بیولوژیکی مغز انسان هستند. ویژگی اصلی آن‌ها توانایی یافتن رابطه غیرخطی بسیار پیچیده بین متغیرها است (Ali, 1994) و می‌توان مدل آموزش دیده از یک مسئله را به دیگر مسائل مشابه تعمیم داد. شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل یافتن روابط غیرخطی سطح بالا، جواب‌های بهتری را برای مسائل پیچیده فراهم می‌کنند (Al Bulushi et al., 2012). شبکه‌های عصبی انواع مختلفی دارد که رایج‌ترین آن‌ها پرسپترون چند لایه می‌باشد (Bishop, 1995; Marwala, 2013).

فرآیندهای کلیدی در ساخت یک مدل شبکه عصبی شامل آماده‌سازی داده‌ها، انتخاب متغیرهای ورودی، انتخاب نوع و ساختار شبکه عصبی، تابع انتقال و الگوریتم آموزش می‌باشند (Maimon and Rokach, 2005). از میان چندین ساختار شبکه‌های عصبی، شبکه پرسپترون چند لایه، به دلیل توانایی تخمین هر تابعی با دقت مناسب، از محبوبیت بیشتری برخوردار است (Bishop, 2007; Zhang and Gupta, 2000). همچنین، شبکه‌های عصبی چند لایه پیشرو به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته و در مسائل عملی استفاده شده است. این نوع شبکه‌های عصبی، به صورت ایده‌آلی، مناسب برای مدلسازی روابط بین یک مجموعه از متغیرهای ورودی یا پیش‌بینی‌کننده و یک یا بیشتر متغیرهای خروجی یا پاسخ می‌باشند (Maimon and Rokach, 2005). از اینرو، از پرسپترون چند لایه پیشرو برای تخمین نرخ نفوذ در چاه‌های مورد مطالعه استفاده شد.

۳-۶-۱-۱. ساختار شبکه

در ساختار شبکه عصبی پرسپترون چند لایه، نرون‌ها داخل گروه‌هایی با نام لایه قرار می‌گیرند. لایه اول و آخر به ترتیب لایه‌های ورودی و خروجی نامیده می‌شوند زیرا ورودی و خروجی کل شبکه را نشان می‌دهند (Demuth et al., 2014; Haykin, 1999). لایه‌های باقی‌مانده به عنوان لایه‌های پنهان شناخته می‌شوند. عموماً، یک شبکه عصبی پرسپترون چند لایه شامل یک لایه ورودی، یک یا تعداد بیشتری لایه پنهان و یک لایه خروجی است (Al Bulushi et al., 2012; Maimon and Rokach, 2005). برای تعیین دقیق تعداد لایه‌ها و نرون‌های هر لایه، روش خاصی وجود ندارد و تنها با استفاده از روش آزمون و خطا می‌توان مقادیر بهینه آن‌ها را مشخص نمود (Haykin, 1999; Horne, 1993). برای این منظور دو هدف کاهش زمان پردازش داده‌ها و افزایش دقت مدل مد نظر قرار گرفت. افزایش تعداد لایه‌ها و نرون‌های هر لایه موجب افزایش دقت مدل می‌شوند ولی همزمان منجر به افزایش زمان پردازش نیز می‌گردند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دقت مدل با افزایش تعداد لایه‌ها به بیشتر از

سه به صورت نامحسوسی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، با توجه به افزایش چشمگیر زمان پردازش مدل شبکه عصبی با چهار لایه نسبت به سه لایه، بیشترین تعداد لایه برابر سه در نظر گرفته شد. بررسی افزایش نرون‌ها در هر لایه نشان داد که زمان پردازش به صورت نمایی با افزایش یک نرون در هر لایه رشد می‌یابد. در حالی که افزایش دقت از یک تعداد مشخص نرون در هر لایه به صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. در جدول ۵-۶ نتایج روش آزمون و خطا برای انتخاب ساختار شبکه عصبی براساس داده‌ها هر چاه ارائه شده است. با توجه به تعداد داده‌های بیشتر در دو چاه AZA و RSA نسبت به دو چاه دیگر، تعداد نرون‌ها در لایه اول آن‌ها بیشتر است.

جدول ۵-۶. ساختار شبکه انتخابی برای هر چاه با استفاده از روش آزمون و خطا

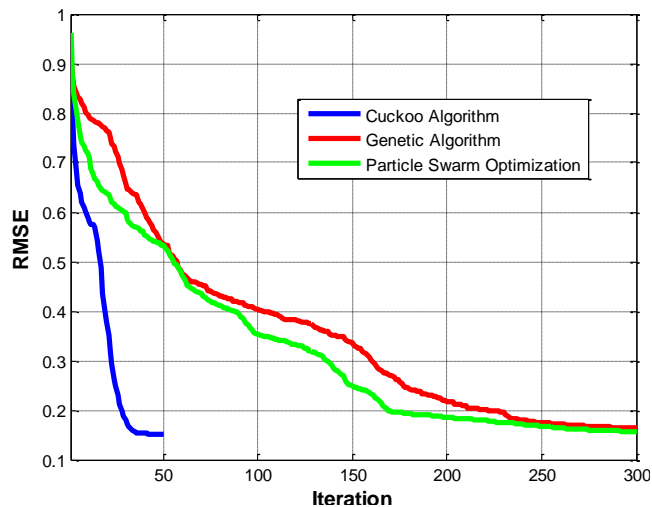
نام چاه	تعداد لایه‌های مدل عصبی	تعداد نرون‌ها در هر لایه
AzA	۳	(۴، ۴، ۳)
KrA	۳	(۳، ۴، ۳)
RSA	۳	(۴، ۴، ۳)
RSB	۳	(۳، ۴، ۳)

۳-۶-۱-۲. الگوریتم آموزش

عمل کلیدی در توسعه یک شبکه عصبی، فرآیند یادگیری است که در آن مقادیر پارامترهای شبکه شامل اوزان و بایاس‌ها در یک فرآیند پیوسته به منظور دستیابی به مقادیر بهینه تابع هدف، اصلاح می‌شوند. معمولاً تابع هدف در این فرآیند یادگیری، حداقل‌سازی خطای مدل تخمینگر یا طبقه‌بند است. الگوریتم‌های یادگیری زیادی وجود دارند که برخی از پرکاربردترین آن‌ها در جدول ۶-۶ ارائه شده است. با توجه به محدودیت‌های الگوریتم‌های کلاسیک در تعیین مقادیر بهینه پارامترهای شبکه عصبی، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند جایگزین بهتری باشد. از اینرو، سه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، ژنتیک و فاخته برای تعیین مقادیر بهینه پارامترهای شبکه عصبی بکار برده شد. برای نمونه در شکل ۳-۶ مقایسه میان سرعت همگرایی و خطای مرحله آموزش این سه الگوریتم براساس پارامترهای انتخاب شده پایگاه داده شماره سوم از سطح اول چاه AZA نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود الگوریتم فاخته در تکرار کمتر از ۵۰ به مقدار خطای ۰/۱۵۲ همگرا شده است؛ این در حالی است که الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات در تکرار ۳۰۰ به ترتیب به خطای ۰/۱۶۴ و ۰/۱۵۶ همگرا شده‌اند. براساس این نتایج می‌توان گفت که الگوریتم فاخته در بهینه‌سازی پارامترهای شبکه عصبی نسبت به دو الگوریتم دیگر قدرتمندتر می‌باشد. بنابراین در این مطالعه، از الگوریتم فاخته در ترکیب با شبکه عصبی برای مدل‌سازی نرخ نفوذ استفاده خواهد شد.

جدول ۶-۶. مقایسه پرکاربردترین الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

الگوریتم یادگیری	اساس عملکرد الگوریتم	محدودیت‌ها
پس انتشار ^۱	از زنجیره قوانین برای تعیین تأثیر هر وزن در ساختار شبکه نسبت به مشتقات تابع خطا استفاده می‌کند (Al Bulushi et al., 2012). فرآیند با محاسبه مشتقات تابع عملکرد در لایه آخر شبکه شروع می‌شود و سپس انتشار مشتقات روبه عقب تا لایه اول شبکه ادامه می‌یابد (Haykin, 1999; Horne, 1993).	<ul style="list-style-type: none"> ✓ سرعت همگرایی پایین ✓ گیر کردن در کمینه محلی ✓ انتخاب مقدار مناسب نرخ یادگیری
پس انتشار با مومنتوم	این روش همانند روش پس انتشار خطا کار می‌کند با این تفاوت که به منظور افزایش سرعت همگرایی، علاوه بر تنظیم وزن‌ها با توجه به گرادیان خطا، وزن‌ها با فاکتور مومنتوم (μ) نیز تغییر می‌کنند.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ یافتن مقادیر بهینه دو پارامتر نرخ یادگیری و مومنتوم ✓ گیر کردن در کمینه محلی
لونبرگ-مارکوت	این روش ترکیبی از دو روش حداقل سازی گرادیان نزولی و گاوس-نیوتن می‌باشد. زمانی که پارامترها از مقادیر بهینه دور باشند این روش همانند گرادیان نزولی عمل می‌کند و در صورتی پارامترها به مقادیر بهینه نزدیک باشند همانند روش گاوس-نیوتن عمل می‌کند.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ گیر کردن در کمینه محلی

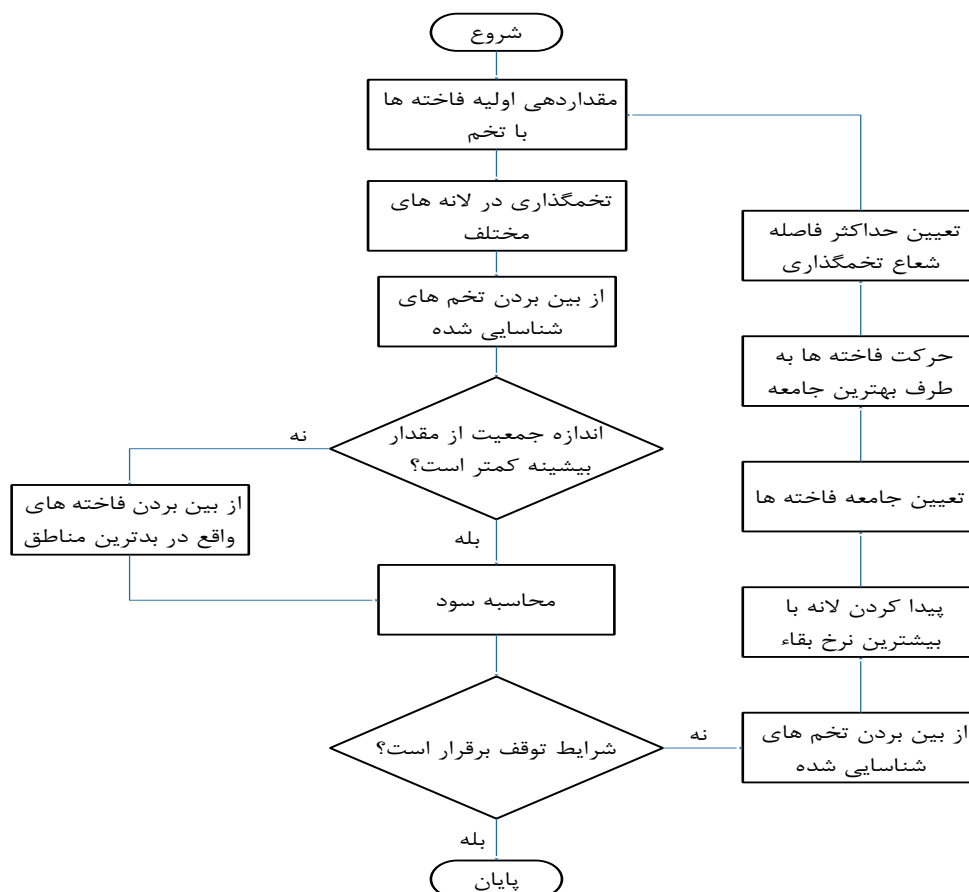


شکل ۶-۳. مقایسه خطا و سرعت همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی فاخته، ژنتیک و ازدحام ذرات

الگوریتم فاخته با الهام از زندگی پرندگانی به نام فاخته ارائه شده است (Rajabioun, 2011). این الگوریتم مناسب برای بهینه‌سازی مسائل غیرخطی پیوسته است. فلوجارت این الگوریتم در شکل ۶-۴ نشان داده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی با یک جمعیت اولیه از فاخته‌ها کار خود را شروع می‌کند. این جمعیت از فاخته‌ها برای نگهداری از تخم‌های خود، آن‌ها را در لانه تعدادی پرند میزبان قرار می‌دهند. تعدادی از این تخم‌ها که شباهت بیشتری به تخم-

¹ Back-Propagation (BP)

های پرنده میزبان دارند شانس بیشتری برای رشد و تبدیل شدن به فاخته بالغ خواهند داشت. سایر تخم‌ها توسط پرنده میزبان شناسایی شده و از بین می‌روند. میزان تخم‌های رشد کرده، مناسب بودن لانه‌های آن منطقه را نشان می‌دهند. هر چه تخم‌های بیشتری در یک ناحیه قادر به رشد باشند و نجات یابند، به همان اندازه فاخته‌ها تمایل بیشتری به آن منطقه نشان می‌دهند؛ بنابراین، موقعیتی که در آن بیشترین تعداد تخم‌ها نجات یابند پارامتری خواهد بود که این الگوریتم قصد بهینه‌سازی آن را دارد. فاخته‌های بالغ حاصل از تخم‌های جمعیت اولیه از فاخته‌ها جوامع و گروه‌هایی را تشکیل می‌دهند. هر گروه منطقه سکونت خود را برای زیست دارد. بهترین منطقه سکونت تمام گروه‌ها مقصد بعدی فاخته‌ها در سایر گروه‌ها خواهد بود. تمام گروه‌ها به سمت بهترین منطقه موجود فعلی مهاجرت می‌کنند. هر گروه در منطقه‌ای نزدیک بهترین موقعیت فعلی ساکن می‌شود. با در نظر گرفتن تعداد تخمی که هر فاخته خواهد گذاشت و همچنین فاصله فاخته‌ها از منطقه بهینه فعلی برای سکونت، تعدادی شعاع تخم‌گذاری محاسبه شده و شکل می‌گیرد. سپس فاخته‌ها شروع به تخم‌گذاری تصادفی در لانه‌های داخل شعاع تخم‌گذاری خود می‌کنند. این فرآیند تا رسیدن به بهترین محل برای تخم‌گذاری (منطقه با بیشترین سود) ادامه می‌یابد. این محل بهینه، جایی است که بیشترین تعداد فاخته‌ها در آن گرد هم می‌آیند. پس از چند تکرار تمام جمعیت فاخته‌ها به یک نقطه بهینه با حداکثر شباهت تخم‌ها به تخم‌های پرندگان میزبان و همچنین به محل بیشترین منابع غذایی می‌رسند این محل بیشترین سود کلی را خواهد داشت و در آن کمترین تعداد تخم‌ها از بین خواهد رفت. این فرآیندها تا زمانی ادامه می‌یابد تا بهترین موقعیت با بالاترین ارزش سود به دست آید و اکثر جمعیت فاخته‌ها در این مکان جمع شوند.



شکل ۶-۴. فرآیند حل مسئله با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

ریشه میانگین مربعات خطا به عنوان تابع هدف این الگوریتم تکاملی در نظر گرفته شد. همانطور که قبلاً گفته شد، بهینه‌سازی فاخته الگوریتمی است که تابع هدف را بیشینه می‌سازد؛ بنابراین، در این مسئله تابع هدف بایستی به صورت منفی در نظر گرفته شود. برای حل یک مسئله بهینه‌سازی با استفاده از فاخته، ابتدا بایستی ماتریس زیستگاه که مشخص کننده تعداد متغیرهای مسئله است، تشکیل شود. در این مسئله، ماتریس زیستگاه با توجه به تعداد نرون‌ها در ساختار پرسپترون چند لایه و ارتباط بین هر یک از آن‌ها با نرون‌های لایه دیگر تعریف می‌شود.

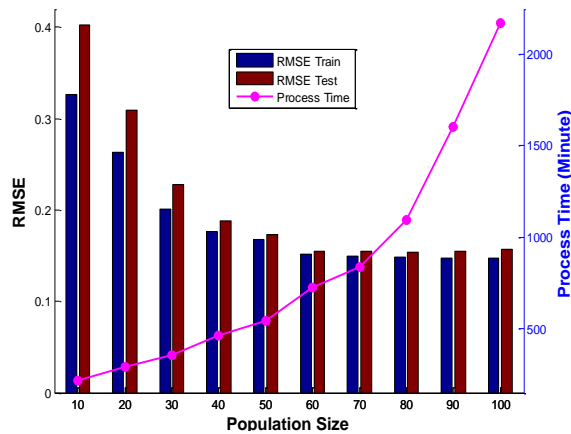
در شروع الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، براساس اندازه جمعیت فاخته‌ها (N_{pop}) و تعداد متغیرها (N_{var})، ماتریسی با اندازه $N_{pop} \times N_{var}$ ایجاد می‌شود و برای هر زیستگاه از جمعیت، تعدادی تخم که به صورت تصادفی تولید شده است اختصاص داده می‌شود. تعداد تخم‌های هر فاخته بین ۵ تا ۲۰ عدد می‌باشد. این اعداد حد بالا و پایین تعداد تخم‌ها در هر تکرار الگوریتم می‌باشد. پارامتر دیگری که در الگوریتم بایستی تعریف شود حداکثر فاصله شعاع تخم‌گذاری است. در یک مسئله بهینه‌سازی، حداکثر فاصله شعاع تخم‌گذاری (ELR) با استفاده از حد پایین (var_{low}) و بالای (var_{hi}) هر متغیر، تعداد تخم‌های فاخته جاری (NCE) و تعداد کل تخم‌ها (TNE)، طبق رابطه ۶-۱ تعریف می‌شود.

$$ELR = \alpha \times \frac{NCE}{TNE} (var_{hi} - var_{low})$$

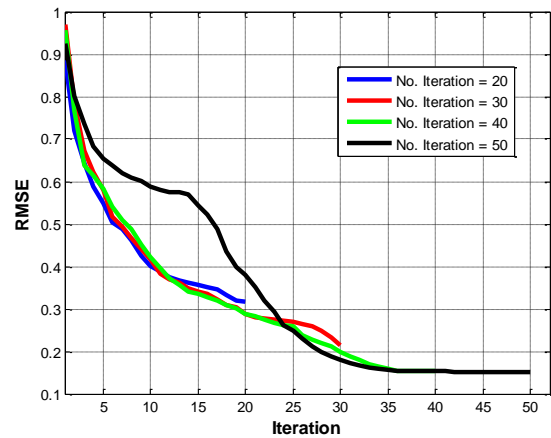
۱-۶

در این رابطه α ضریب تعدیل بیشینه شعاع تخم‌گذاری است که مقدار اولیه آن برای تخمین نرخ نفوذ در چاه‌های مورد مطالعه برابر یک در نظر گرفته شد. در تکرارهای بعدی این الگوریتم این ضریب یک درصد تقلیل پیدا خواهد کرد. این تقلیل علاوه بر افزایش سرعت عملکرد سیستم، دقت نتایج نهایی را افزایش خواهد داد.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای کلیدی در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته، جمعیت فاخته‌ها و تعداد تکرارهای الگوریتم می‌باشد. برای تعیین مقادیر بهینه این پارامترها، بایستی از روش تحلیل حساسیت استفاده نمود. براین اساس دو هدف کمینه‌سازی زمان پردازش داده و بیشینه‌سازی دقت مدل تخمین‌گر همزمان برای تعیین مقادیر بهینه این پارامترها در نظر گرفته شد. برای نمونه در شکل ۵-۶ نمودار مربوط به تحلیل حساسیت انجام شده براساس پارامترهای انتخاب شده پایگاه شماره سه از سطح اول چاه AZA روی این دو پارامتر نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۶ (الف) مشاهده می‌شود تغییرات خطای مدل از مقدار تکرار ۳۵ به بعد بسیار ناچیز است. از اینرو، تعداد تکرارهای الگوریتم فاخته برابر ۴۰ در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل حساسیت روی تعداد جمعیت فاخته‌ها در شکل ۵-۶ (ب) نشان می‌دهد که با افزایش جمعیت، زمان پردازش و دقت مدل تخمین‌گر افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد فاخته‌ها، زمان پردازش مدل به صورت نمایی افزایش می‌یابد؛ اما بررسی دقت مدل نشان می‌دهد که افزایش جمعیت از ۶۰ فاخته بیشتر دقت مدل را به صورت اندکی بهبود می‌دهد. می‌توان از این بهبودی اندک در مقایسه با افزایش زمان پردازش مدل صرف نظر نمود. بنابراین، تعداد جمعیت فاخته‌ها برابر ۶۰ در نظر گرفته شد. این تحلیل حساسیت روی پارامترهای الگوریتم فاخته براساس پارامترهای انتخاب شده همه چاه‌ها صورت گرفت. در جدول ۶-۷ نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته روی این دو پارامتر براساس داده‌های چاه‌های مورد مطالعاتی ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۶-۵. نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم فاخته: (الف) تعداد تکرار و (ب) جمعیت فاخته‌ها

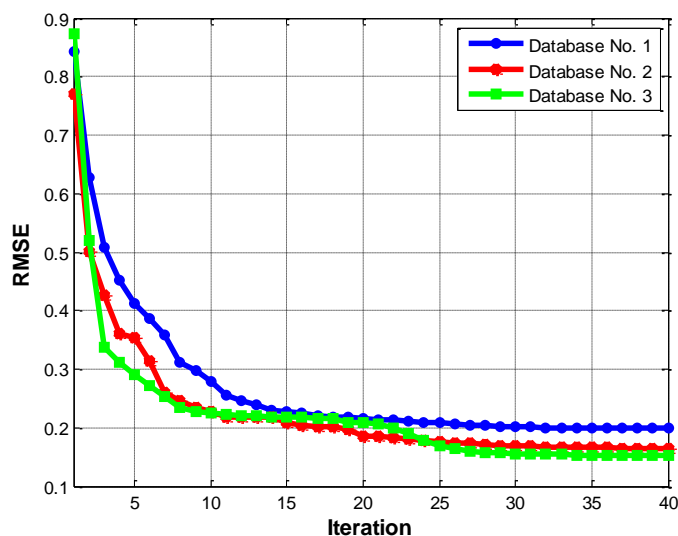
جدول ۶-۷. نتایج تحلیل حساسیت روی پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته براساس اطلاعات چاه‌های

مورد مطالعه

نام چاه	جمعیت فاخته	بیشینه جمعیت فاخته	تعداد تکرار
AzA	۶۰	۶۰	۴۰
KrA	۴۰	۵۰	۳۰
RSA	۶۰	۷۰	۴۰
RSB	۴۰	۴۰	۳۰

۳-۱-۳-۶. نتایج مدل

در شکل ۶-۶ تغییرات مقدار خطا در تکرارهای مختلف مرحله آموزش مدل شبکه عصبی براساس پارامترهای انتخاب شده از سه پایگاه داده مختلف سطح اول چاه AzA نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نرخ تغییرات خطا از تکرارهای ۳۰ به بعد برای هر سه مدل ناچیز است. لذا؛ می‌توان گفت که تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای الگوریتم فاخته به درستی انتخاب شده است. روند تغییرات خطا در تکرارهای مختلف برای سایر چاه‌ها نیز در بخش پیوست نشان داده شده است (شکل ۶-۹ برای چاه KrA، شکل ۹-۱۹ برای چاه RSA و شکل ۹-۳۲ برای چاه RSA).



شکل ۶-۶. تغییرات خطا (RMSE) در تکرارهای مختلف الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با استفاده از پایگاه داده‌های مختلف چاه AZA

مقایسه مقادیر خطا و ضریب تعیین مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA براساس پارامترهای انتخاب شده سه پایگاه داده مختلف سطح اول چاه AZA در جدول ۶-۸ ارائه شده است. در صورت استفاده از ویژگی‌های سنگ در مدل نرخ نفوذ، خطای تخمین به مراتب کاهش می‌یابد؛ به خصوص اگر این ویژگی، از پارامترهای ژئومکانیکی سنگ باشد. بررسی تفاوت خطای مرحله آموزش و آزمون پایگاه‌های داده مختلف نشان می‌دهد که با اضافه شدن ویژگی‌های سنگ در مدل نرخ نفوذ، مقدار اختلاف خطای این دو مرحله کاهش می‌یابد. به طوری که کمترین اختلاف خطا برای پایگاه داده شماره ۳ مشاهده شده است. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل‌های ایجاد شده براساس پایگاه‌های داده مختلف چاه‌های دیگر در پیوست ارائه شده است (جدول ۹-۸ برای چاه KrA، جدول ۹-۱۹ برای چاه RSA و جدول ۹-۳۰ برای چاه RSB).

جدول ۶-۸. مقایسه مدل‌های ایجاد شده براساس مقادیر خطا و ضریب تعیین بدست آمده در دو مرحله

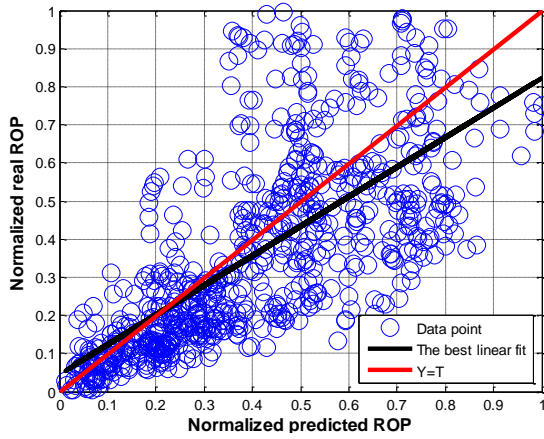
آموزش و آزمون براساس پایگاه داده مختلف چاه AZA

شماره پایگاه داده	مرحله	R-Square	RMSE
۱	آموزش	۰/۴۸۷	۰/۱۹۹
	آزمون	۰/۴۸۱	۰/۲۰۵
۲	آموزش	۰/۵۶۵	۰/۱۶۵
	آزمون	۰/۵۶۱	۰/۱۶۷
۳	آموزش	۰/۶۳۲	۰/۱۵۳
	آزمون	۰/۶۳۱	۰/۱۵۴

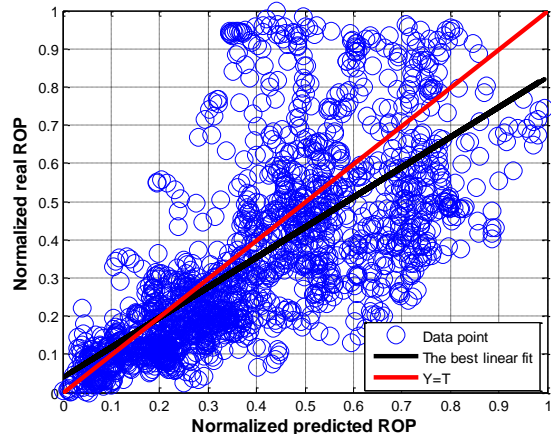
در شکل ۶-۷ نمودار متقاطع نرخ نفوذ نوفه‌زدایی نرمالیزه شده و تخمینی نرمالیزه شده با استفاده از مدل‌های MLP-COA ایجاد شده براساس پارامترهای انتخاب شده پایگاه داده‌های مختلف چاه AZA نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود مدل مربوط به پایگاه داده شماره ۱ در مرحله آموزش مقادیر نرخ حفاری را در مقادیر بالای آن، بیش برآورد کرده است. همین بیش برآورد در داده‌های آزمون این مدل نیز مشاهده می‌شود. هرچند این مدل در مقادیر پایین‌تر، مقدار نرخ نفوذ را کمتر برآورد کرده است. در مدل مربوط به پایگاه داده شماره ۲ نیز همین پدیده برای داده‌های مرحله آموزش و آزمون رخ داده است ولی شدت آن به مراتب از مدل قبلی کمتر است. در مدل مربوط به پایگاه داده شماره ۳ مشاهده می‌شود که بیش برآورد مقادیر نرخ نفوذ نسبت به دو مدل دیگر ناچیز است و تنها در مقادیر پایین نرخ نفوذ، مدل مقدار نرخ نفوذ را کمتر برآورد کرده است. این در حالی است که شدت آن در داده‌های آزمون نیز تقلیل یافته است. براساس این مشاهدات و تفاسیر می‌توان با اطمینان بیان داشت که افزودن ویژگی سنگ (نگار پتروفیزیکی و یا ژئومکانیکی) موجب افزایش دقت مدل در دو مرحله آموزش و آزمون می‌شود، چه بسا این ویژگی، یک ویژگی ژئومکانیکی سنگ باشد.

در شکل ۶-۸ مقایسه مقادیر نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی با استفاده از مدل‌های سه پایگاه داده چاه AZA نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تلفیق ویژگی‌های سنگ با پارامترهای عملیاتی حتی در روش شبکه عصبی نیز موجب بهبود دقت و ضریب تعیین مدل تخمین-گر شده است. مقایسه شکل ۶-۸ (ب و ج) با قسمت (الف) نشان می‌دهد که در حالت استفاده از پارامترهای عملیاتی به تنهایی، مدل تخمین‌گر نرخ حفاری تنها توانسته است روند کلی تغییرات نرخ نفوذ را پیش‌بینی کند. این در حالی است که ورود ویژگی‌های ژئومکانیکی در مدل پیش‌بینی‌کننده نرخ نفوذ موجب تخمین تغییرات محلی و نوسانات نرخ حفاری می‌شود.

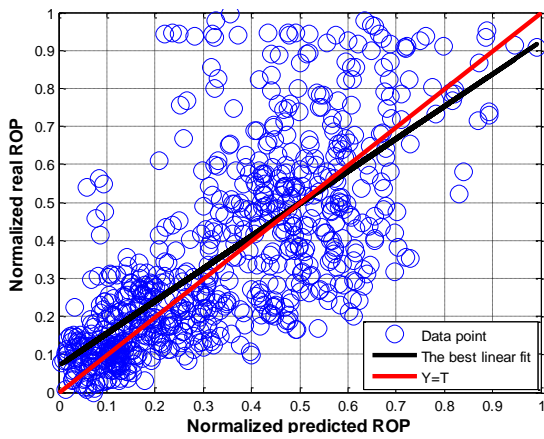
نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نرمالیزه شده و نرخ نفوذ تخمینی نرمالیزه شده با مدل MLP-COA و پایگاه‌های داده مختلف سطح اول سایر چاه‌ها در بخش پیوست ارائه شده است (شکل ۹-۷ برای چاه K_{rA}، شکل ۹-۲۰ برای چاه RSA و شکل ۹-۳۳ برای چاه RSB). همچنین مقایسه مقادیر نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل‌های MLP-COA با استفاده از پایگاه‌های داده مختلف سطح اول سایر چاه‌ها در ادامه پیوست نشان داده شده است (شکل ۹-۸ برای چاه K_{rA}، شکل ۹-۲۱ برای چاه RSA و شکل ۹-۳۴ برای چاه RSB). تحلیل‌های صورت گرفته برای مدل‌های چاه AZA برای این چاه‌ها نیز انجام شد.



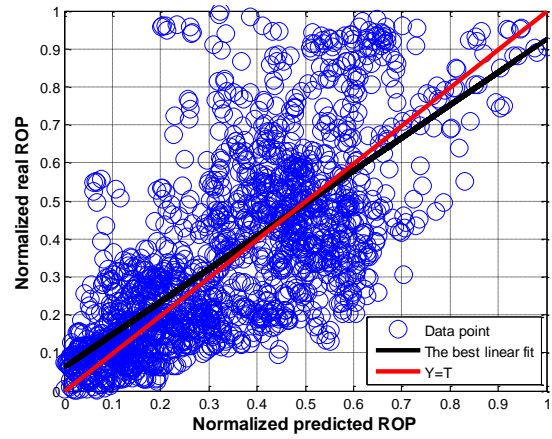
(ب) مرحله آزمون پایگاه داده شماره ۱



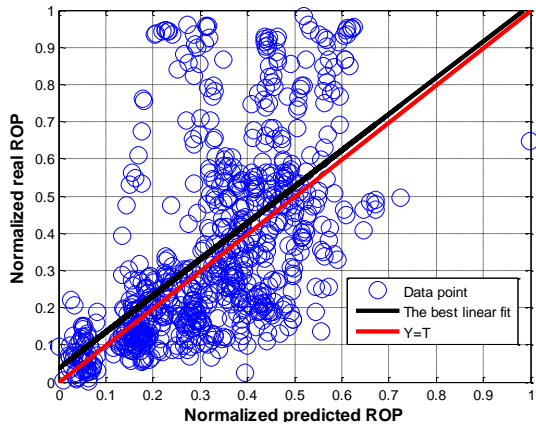
(الف) مرحله آموزش پایگاه داده شماره ۱



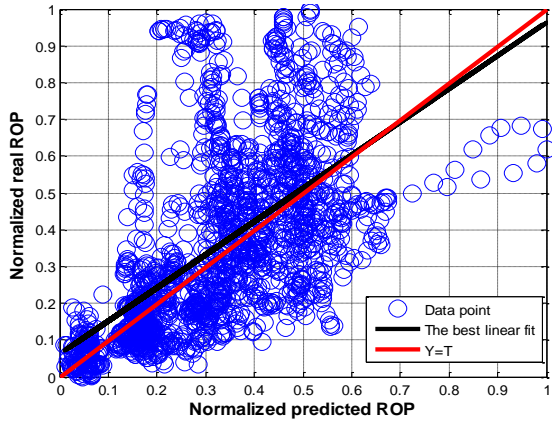
(د) مرحله آزمون پایگاه داده شماره ۲



(ج) مرحله آموزش پایگاه داده شماره ۲

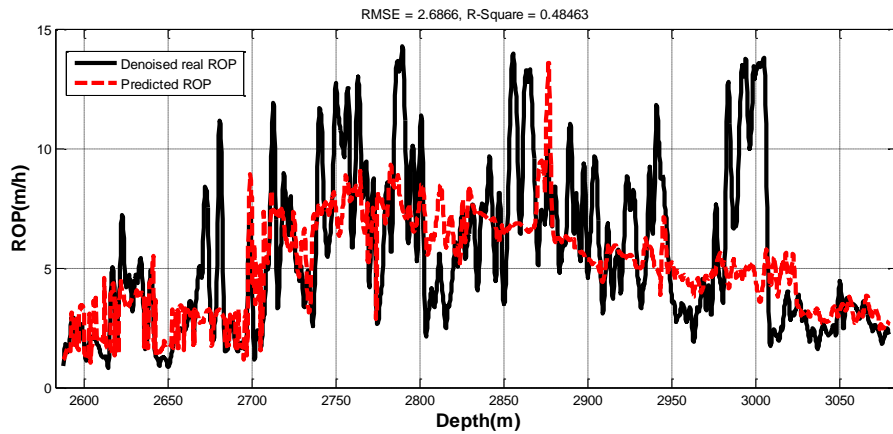


(ه) مرحله آزمون پایگاه داده شماره ۳

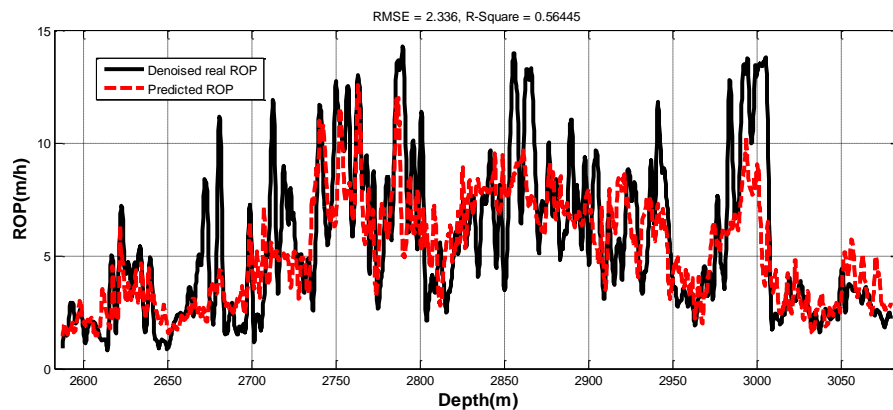


(و) مرحله آموزش پایگاه داده شماره ۳

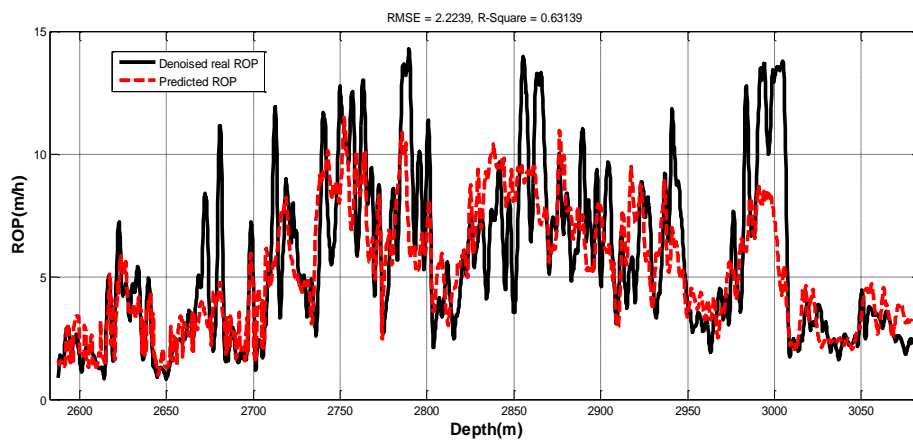
شکل ۶-۷. نمودار متقاطع نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده نرمالیزه و نرخ نفوذ تخمینی نرمالیزه حاصل از مدل MLP-COA برای مرحله آموزش (الف، ج، و) و آزمون (ب، د، ه) با استفاده از پایگاه داده‌های چاه Aza



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶-۸. مقایسه مقدار نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی با استفاده از مدل‌های ایجاد شده براساس پارامترهای انتخاب شده پایگاه داده: (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳

۶-۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل، برای پی‌بردن به اهمیت مشخصات سازندی در پیش‌بینی نرخ حفاری، ابتدا رابطه هر یک از پارامترها با نرخ نفوذ با استفاده از روش رگرسیون بررسی شد. سپس با استفاده از پارامترهای انتخاب شده در هر یک از پایگاه‌های داده سطح اول در فصل قبل و رگرسیون چند متغیره غیرخطی به مدل‌سازی نرخ نفوذ پرداخته شد. به منظور اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی، شبکه عصبی

پرسپترون چند لایه همراه با الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای مدل‌سازی نرخ نفوذ با استفاده از پارامترهای انتخابی به کار برده شد.

بررسی رابطه هر یک از پارامترهای مورد مطالعه با نرخ حفاری نشان داد؛ که بهترین رابطه بین این پارامترها اکثراً به صورت سهمی می‌باشد. اما تحلیل روابط سهمی با استفاده از مقادیر این پارامترها، نشان داد که نتایج غیرمعقول و غیرمنطقی برای نرخ نفوذ حاصل می‌شود. بنابراین، روابط نمایی به عنوان بهترین رابطه برازش شده بین هر یک از این پارامترها با نرخ نفوذ انتخاب شد. مقایسه خطا و ضریب همبستگی بین هر یک از پارامترهای مورد بررسی و نرخ حفاری نشان داد؛ که، مقاومت فشاری محصور شده به عنوان یک پارامتر ژئومکانیکی سنگ، حتی از پارامترهای عملیاتی نیز، رابطه قوی‌تری با نرخ نفوذ دارد.

به منظور مدل‌سازی نرخ نفوذ با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره، ترکیبات متعددی از توابع مختلف برای پارامترهای انتخابی بررسی شد. نتایج این بررسی نشان داد که بهترین تابع برای همه این پارامترها به صورت نمایی است. از اینرو، مدل رگرسیونی با مؤلفه‌های نمایی از پارامترهای انتخابی در نظر گرفته شد. هر یک از مؤلفه‌های این مدل که دارای سطح معنی داری کمتر از ۵ درصد است و منجر به کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا می‌شود؛ در مدل رگرسیونی لحاظ شد. در جدول ۶-۹ مقایسه مقادیر خطای مدل‌های رگرسیونی در چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود؛ مقادیر خطا در مدل شماره ۲، که در برگزیده نگارهای پتروفیزیکی و پارامترهای عملیاتی است، نسبت به مدل شماره ۱، که تنها در برگزیده پارامترهای عملیاتی است، کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. مقدار کاهش خطا در مدل شماره ۳، که در برگزیده پارامترهای ژئومکانیکی و عملیاتی است، نسبت به مدل‌های شماره ۱ و ۲ بسیار چشمگیر می‌باشد. در صورتی که نگارهای پتروفیزیکی به عنوان خواص سنگ در چاه‌های مورد مطالعه استفاده شود به طور میانگین دقت مدل ۷ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی به طور میانگین موجب بهبود ۱۳ درصدی در دقت مدل‌های تخمین‌گر خواهد شد.

جدول ۶-۹. مقایسه خطای مدل‌های رگرسیونی در چاه‌های مختلف مورد مطالعه

نام چاه	مدل شماره ۱	مدل شماره ۲	مدل شماره ۳
AzA	۲/۷۹۶	۲/۶۲۶	۲/۲۲۸
KrA	۰/۴۵۲	۰/۴۸۴	۰/۴۸۳
RSA	۰/۹۱۹	۰/۸۴۹	۰/۸۱۳
RSB	۰/۴۵۹	۰/۴۴۷	۰/۴۰۱

مدل‌سازی نرخ نفوذ با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه و الگوریتم فاخته نیز نشان داد؛ که در شرایط برابر، مدل‌های نرخ نفوذی که در برگیرنده ویژگی‌های سنگ هستند؛ از دقت و ضریب همبستگی بالاتری برخوردارند. در جدول ۶-۱۰ مقایسه مقادیر خطای مدل‌های شبکه عصبی پرسپترون چند لایه براساس پایگاه‌های داده مختلف سطح اول ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود خطای مدل پایگاه داده شماره ۲ نسبت به مدل پایگاه داده شماره ۱ کاهش یافته است. کاهش خطای مدل پایگاه داده شماره ۳ نسبت به مدل‌های پایگاه داده شماره ۱ و ۲ چشمگیر می‌باشد. با توجه به این مقایسه، استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی به جای نگارهای پتروفیزیکی، به عنوان عوامل سازندی، در تخمین نرخ حفاری توصیه می‌شود. مقدار بهبودی دقت مدل پایگاه داده شماره ۲ نسبت به پایگاه داده شماره ۱ در چاه‌های مورد مطالعه به طور میانگین برابر ۱۳ درصد و مقدار افزایش دقت مدل پایگاه داده شماره ۳ نسبت به مدل پایگاه داده شماره ۱ در چاه-های مورد مطالعه به طور میانگین برابر ۱۸ درصد می‌باشد.

جدول ۶-۱۰. مقایسه خطای مدل‌های شبکه عصبی سطح اول پایگاه داده در چاه‌های مختلف مورد مطالعه

نام چاه	مدل پایگاه داده شماره ۱	مدل پایگاه داده شماره ۲	مدل پایگاه داده شماره ۳
AzA	۲/۶۸۷	۲/۳۳۶	۲/۲۲۴
KrA	۰/۴۹۸	۰/۴۳۹	۰/۴۱۵
RSA	۰/۸۸۵	۰/۸۳۰	۰/۷۶۹
RSB	۰/۴۲۲	۰/۳۲۸	۰/۳۱۲

با توجه به مقایسه انجام شده میان مقادیر خطای مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی برای پایگاه داده‌های مختلف سطح اول، می‌توان به قطعیت گفت که استفاده از ویژگی‌های سنگ در مدل‌های نرخ نفوذ موجب بهبود دقت مدل تخمین‌گر خواهد شد. افزایش دقت این مدل‌ها، در صورت به کارگیری پارامترهای ژئومکانیکی به جای نگارهای پتروفیزیکی، چشمگیرتر خواهد بود. دلیل این امر در تلفیق بیش از یک نگار پتروفیزیکی در تخمین پارامترهای ژئومکانیکی است.

فصل هفتم: توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ

۷-۱. مقدمه

قابلیت حفاری به صورت گسترده در حوزه معدن و عمران برای تخمین نرخ نفوذ ابزارهای حفاری به کار برده شده است. این در حالی است که در حوزه نفت کمتر به این مسئله پرداخته شده است. اکثر مطالعات در این زمینه به استفاده از نتایج آزمایش حفاری کوچک و ارتباط نگرهای پتروفیزیکی با نتایج این آزمایش محدود شده است. شاخص‌های بدست آمده در این مطالعات، به دلیل عدم لحاظ شرایط واقعی چاه، در عمل کارایی لازم را ندارند. از اینرو، مهندسی حفاری به منظور تخمین قابلیت حفاری سنگ از پارامتری به نام "d-exponent" استفاده می‌کنند (Aadnoy, 2010). این پارامتر بدون لحاظ هیچ یک از ویژگی‌های سنگ و تنها با استفاده از نرخ نفوذ، قطر مته، سرعت دوران و وزن روی مته محاسبه می‌شود. بنابراین نمی‌تواند بیان‌کننده قابلیت حفاری سنگ باشد. لذا در این فصل برای توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ، که سازگاری بیشتری با شرایط واقعی چاه دارد، تلاش خواهد شد. برای نیل به این هدف از نتایج آزمایش نفوذ و ارتباط آن با داده‌های واقعی ثبت شده در چاه بهره برده خواهد شد.

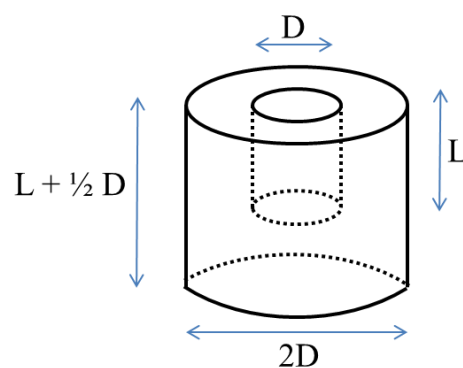
۷-۲. تعیین شاخص قابلیت حفاری مبتنی بر آزمایش نفوذ

با توجه به توضیحات ارائه شده در فصل اول، مبنی بر شاخص‌های مختلف قابل استخراج از نمودار نیرو-نفوذ آزمایش نفوذگر و همچنین موفقیت این آزمایش در ارائه شاخص‌های با همبستگی بالا برای پیش‌بینی پیشروی ماشینی تونل‌زنی، این آزمایش برای استخراج ویژگی‌های شکست سنگ بر روی نمونه‌های تهیه شده مورد استفاده قرار گرفت.

۷-۲-۱. مشخصات دستگاه نفوذ نفوذگر

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این آزمایش، نفوذ کننده داخل نمونه سنگی که با مواد پرکننده و لوله فولادی مخصوص احاطه شده است نفوذ میکند. در شکل ۷-۱۱ ابعاد لوله فولادی مورد استفاده در این آزمایش براساس قطر نمونه نشان داده شده است. این ابعاد حداقل ابعاد مورد نیاز براساس یافته‌های جونگ و همکاران (۲۰۱۵) است. براین مبنا قطر داخلی و طول لوله فولادی به ترتیب برابر ۲۲۰ و ۱۲۰ میلیمتر انتخاب شد. ضخامت لوله فولادی نیز ۱۰ میلیمتر می‌باشد. مواد پرکننده مورد استفاده در تحقیقات قبلی عموماً از جنس گچ بوده است. با توجه به اینکه کاربردهای پیشین این آزمایش مربوط به تخمین پیشروی ابزار حفاری در نزدیک سطح زمین بوده است و مقادیر نیروی محصورکننده

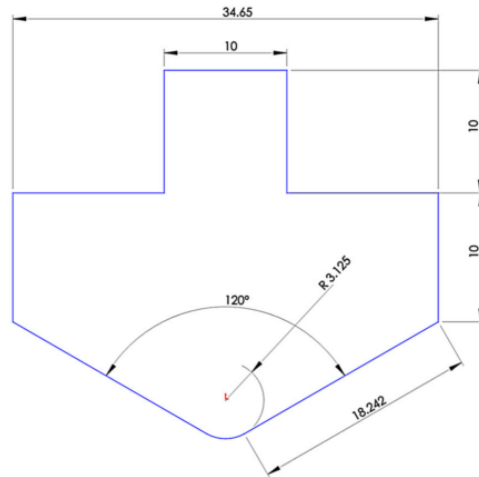
در سطح نسبت به اعماق زیاد، ناچیز است، لذا جنس مواد پرکننده در این مطالعه ترکیبی از سیمان و گچ در نظر گرفته شد تا بدین صورت امکان تراکم‌پذیری مواد پرکننده کاسته و اجازه جابه‌جایی کمتری به نمونه سنگ داده شود. ارزیابی طرح اختلاط نشان داد که نسبت ۳۰۰ گرم گچ با ۷۰۰ گرم سیمان و ۴۰۰ سی‌سی آب مقاومت تراکمی ۷ روزه خوبی دارد.



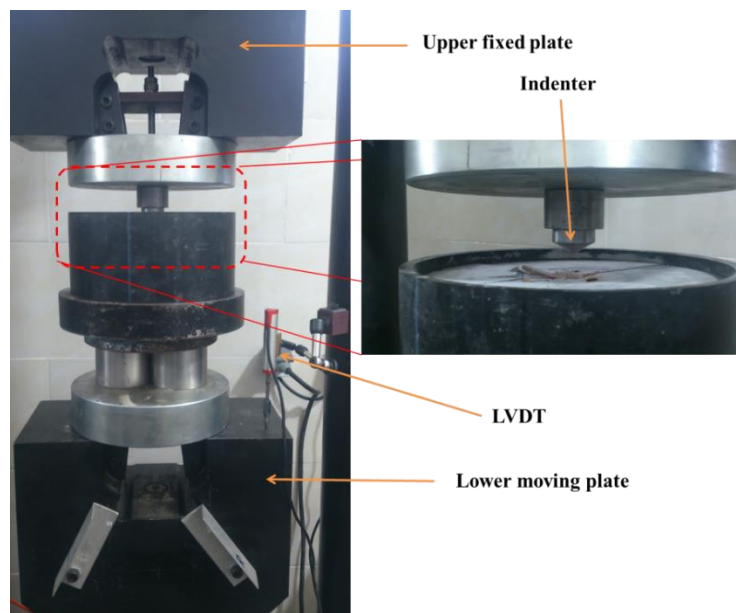
شکل ۷-۱. ابعاد لوله فولادی براساس ابعاد نمونه سنگ مورد آزمایش (Jeong et al., 2015)

در مطالعات قبلی از نفوذکننده‌هایی با شکل‌های مختلف برای انجام این آزمایش استفاده شده است. بسیاری از درج مته‌ها^۱ شکلی کروی یا مخروطی دارند (Ajibose et al., 2015). به این دلیل در این مطالعه از مشخصات نفوذکننده‌ای مشابه نفوذکننده مورد استفاده در مطالعات یاگیز (۲۰۰۹) و جونگ و همکاران (۲۰۱۵) که شکلی مخروطی دارد، استفاده شد (شکل ۷-۲). جنس این نفوذکننده از فولاد آلیاژی MO45 می‌باشد. این فولاد آلیاژی بر مبنای سختی مورد نیاز، تعداد آزمایش‌ها و براساس نظر کارشناسان متالورژی و مواد انتخاب شده است. در شکل ۷-۳ دستگاه آزمایش نفوذ و موقعیت کرنش-سنج نشان داده شده است. این دستگاه در شرکت مکانیک سنگ نفت آسیا طراحی و ساخته شد.

¹ drill bit inserts



شکل ۲-۷. نمودار شماتیک نفوذکننده مورد استفاده در این مطالعه (ابعاد به میلی‌متر) (Jeong et al., 2015)

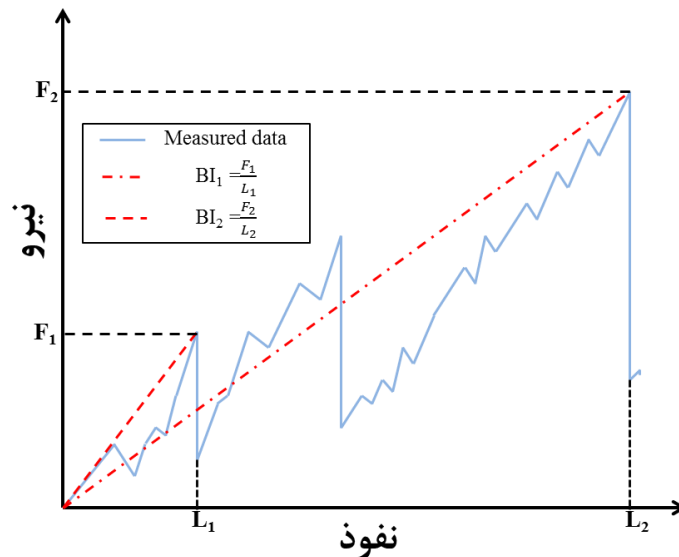


شکل ۳-۷. دستگاه آزمایش و موقعیت مخروط نفوذکننده و کرنش‌سنج

۲-۲-۷. روش انجام آزمایش و تحلیل نتایج

استانداردی برای روند انجام آزمایش نفوذ نفوذگر و استخراج شاخص‌های مختلف از آن توسط جامعه مکانیک سنگ ارائه نشده است (Jeong et al., 2015). در آزمایش نفوذ نفوذگر، نیروی نرمال در زمان نفوذ توسط یک نفوذ کننده به نمونه سنگ محصور شده داخل حلقه فولادی مخصوص اندازه‌گیری می‌شود. اعمال نیرو با نرخ نفوذ ثابت یک هزارم اینچ بر ثانیه انجام می‌شود. سپس مقدار نیروی اندازه‌گیری شده در برابر عمق نفوذ برای تحلیل بیشتر رسم می‌شود (شکل ۴-۷). آزمایش تا زمانی ادامه دارد که عمق نفوذ به ۶ میلی‌متر برسد.

شاخص‌های متنوعی را می‌توان از تحلیل نمودار نیرو-نفوذ حاصل از این آزمایش استخراج نمود. در شکل ۴-۷ دو نمونه از شاخص‌های مورد استفاده در تحقیقات قبلی و چگونگی محاسبه آن نشان داده شده است. از این دو شاخص برای محاسبه تردی سنگ استفاده شده است. هرچه مقادیر این دو شاخص بالاتر باشد نشان می‌دهد که سنگ شکننده‌تر است. علاوه بر این، در تحقیقات پیشین، مساحت زیر نمودار (BI_3) نیز برای تعیین تردی سنگ استفاده شده است.



شکل ۴-۷. نمودار شماتیک نیرو-نفوذ حاصل از انجام آزمایش و نحوه تعیین شاخص‌های تردی

در این مطالعه برای محاسبه شاخص قابلیت حفاری سنگ مخزن، از شاخص جدیدی به عنوان شاخص قابلیت حفاری سنگ^۱ استفاده خواهد شد. این شاخص با استفاده از رابطه ۱-۷ محاسبه می‌شود. علاوه بر این از سه شاخص تردی معرفی شده قبلی نیز بدین منظور بهره برده خواهد شد. زیرا تردی شاخصی از راحتی توسعه ترک است زمانی که تنش از یک آستانه معین تجاوز کند (Ramezanzadeh and Hood, 2010).

$$RDI = \frac{F_{max}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i} \quad 1-7$$

در این رابطه F_{max} بیشینه نیروی وارد شده بر سنگ در مدت زمان انجام آزمایش است. مخرج کسر در رابطه ۱-۷، نشان دهنده میانگین‌گیری از نیروهای وارد شده بر سنگ است؛ بنابراین، هرچه بیشینه نیرو و میانگین نیروهای وارده بر یک سنگ به ترتیب بیشتر و کمتر باشد (یعنی مقدار RDI بیشتر باشد) نشان می‌دهد که آن سنگ از قابلیت حفاری بالایی برخوردار است.

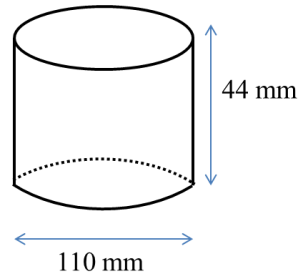
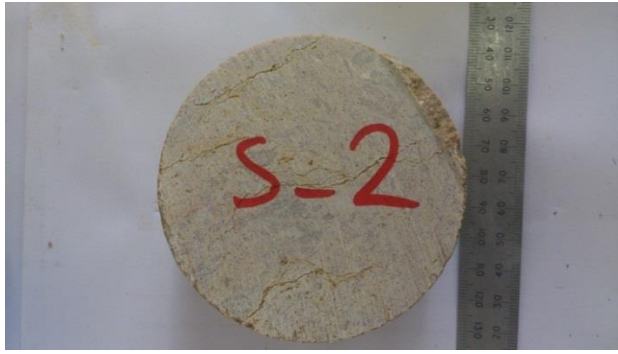
¹ Rock Drillability Index (RDI)

۷-۲-۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

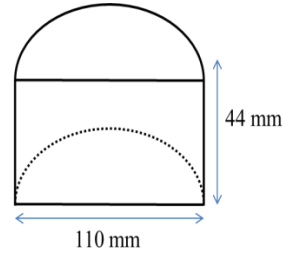
بیشترین کاربرد آزمایش نفوذ نفوذگر در پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین تونل‌زنی^۱ بوده است. براین اساس تعداد نمونه مغزه‌های بدست آمده در تونل‌ها به مراتب بیشتر از چاه‌های نفت و گاز است. همچنین فرآیند مغزه‌گیری در چاه‌های نفت و گاز از هزینه‌های بالایی برخوردار است. این عوامل موجب محدودیت در انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی به ویژه نوع مخرب آن بر روی نمونه‌های سنگی بدست آمده از چاه‌های نفت و گاز می‌شود. از طرفی تعداد آزمایش‌های لازم برای دستیابی به یک جواب با اطمینان بالا برای یک نمونه بین ۳ تا ۵ می‌باشد. لذا برای تعیین حداقل ابعاد نمونه مورد نیاز برای انجام آزمایش، سناریوی تقسیم نمونه‌ها به نمونه‌های کوچکتر مطرح شد تا بتوان با انجام تعداد آزمایش‌های بیشتر روی نمونه‌های مشابه، جوابی با اطمینان بالا بدست آورد.

مطالعه صورت گرفته توسط جونگ و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که طول نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش بایستی حداقل برابر ۴۱ میلی‌متر باشد. قطر نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌های قبلی برابر ۵۴ میلی‌متر بوده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطالعه‌ای روی حداقل قطر لازم برای انجام این آزمایش انجام نشده است. برای تعیین حداقل قطر لازم، تعدادی نمونه از رخنمون سازند مورد مطالعه تهیه شد. با توجه به اینکه نمونه‌ها دارای قطر و طولی به ترتیب ۱۱۰ و ۴۴ میلی‌متر بودند، لذا هر کدام از نمونه‌ها به صورت قطری به دو یا چهار نمونه تقسیم شدند. شکل ۷-۵ نمونه‌های تهیه شده با سه شکل مختلف را برای تعیین حداقل قطر نمونه سنگ در انجام آزمایش نفوذ را نشان می‌دهد.

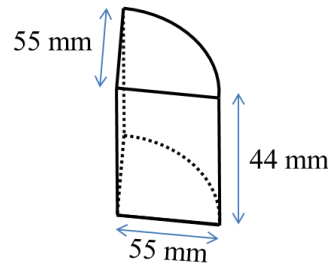
^۱ Tunnel Boring Machine (TBM)



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵-۷. نمونه‌های تهیه شده به منظور تعیین حداقل قطر لازم برای انجام آزمایش نفوذ: (الف) استوانه، (ب) نصف استوانه و (ج) یک چهارم استوانه

مقایسه میان نتایج آزمون نفوذگر برای این سه شکل مختلف نشان داد که مقادیر شاخص‌های بدست آمده بسیار نزدیک به هم می‌باشند؛ بنابراین، در صورت امکان هر یک از نمونه‌ها حداکثر به چهار قسمت مساوی به صورت قطری تقسیم شدند (نمونه‌هایی با شکل ۵-۷ (ج)). برای اساس از ۹ نمونه مغزه گرفته شده از نقاط عمقی مختلف در دو چاه در جنوب غربی ایران جمعاً ۱۴ نمونه کوچکتر برای انجام آزمایش نفوذگر بدست آمد. تعدادی از نمونه‌های کوچکتر به دلیل وجود درزه، در طول فرآیند آماده سازی نمونه‌ها شکستند؛ بنابراین، از این نمونه‌ها برای انجام آزمایش صرفه نظر شد. در جدول ۱-۷ اطلاعات کلی مربوط به نمونه‌های تهیه شده نشان داده شده است. تحلیل نگارهای پتروفیزیکی دو چاه نشان داد؛ که محدوده تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تهیه شده، بین ۷۴ تا

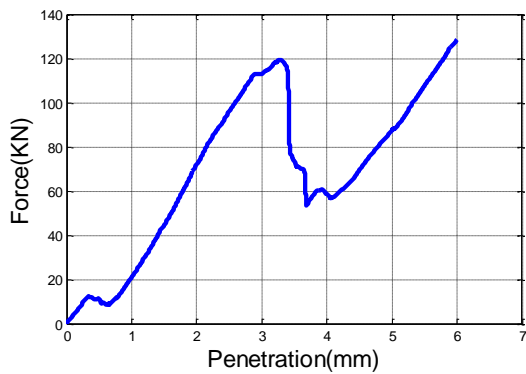
۱۰۵ مگاپاسکال می‌باشد. سنگ‌هایی با این مقادیر مقاومت فشاری تک محوری جزو سنگ‌های متوسط و سخت محسوب می‌شوند.

جدول ۷-۱. اطلاعات کلی مربوط به نمونه‌های تهیه شده از دو چاه

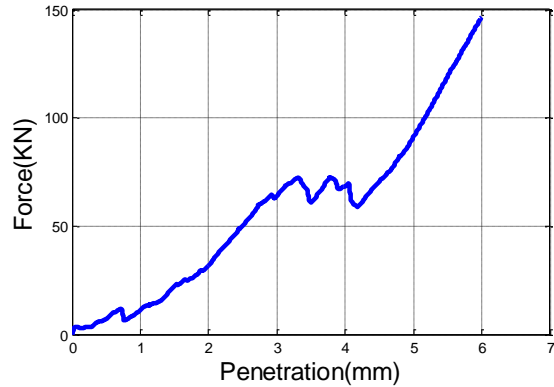
Sub-Sample ID	تعداد زیر نمونه تهیه شده	عمق نمونه‌برداری	نام چاه	Sample ID
SP1-1 SP1-2 SP1-3	۳	۲۴۹۰/۱۸۵۰	چاه KrA	SP1
SP2-1 SP2-2 SP2-3	۳	۲۵۱۰/۳۵۰	چاه KrA	SP2
SP3-1	۱	۲۵۳۱/۳۵۰	چاه KrA	SP3
SP4-1	۱	۲۵۳۶/۵۰۰	چاه KrA	SP4
SP5-1	۱	۲۵۴۴/۵۰۰	چاه KrA	SP5
SP6-1	۱	۳۰۱۹/۵۰۰	چاه X	SP6
SP7-1 SP7-2	۲	۳۰۶۰/۱۰۰	چاه X	SP7
SP8-1	۱	۳۰۶۳/۵۰۰	چاه X	SP8
SP9-1	۱	۳۰۸۱/۱۵۰	چاه X	SP9

۷-۲-۴. نتایج

شکل ۶-۷ دو نمونه از نمودار نیرو-نفوذ حاصل از انجام آزمایش نفوذگر بر روی نمونه‌های تهیه شده از دو چاه KrA و X را نشان می‌دهد. شکل ۶-۷ (الف) نشان می‌دهد که شیب نمودار نیرو-نفوذ در ابتدای آزمایش کم و سپس شیب نمودار افزایش می‌یابد. در حالی که شیب نمودار نیرو-نفوذ در شکل ۶-۷ (ب) تقریباً ثابت باقی‌مانده است. با توجه به اینکه نمونه‌های گرفته شده از چاه KrA مربوط به اعماق کم می‌باشد لذا تخلخل در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های چاه X بالاتر می‌باشد؛ بنابراین، علت این تغییر شیب نمودار در نمونه‌های چاه KrA مربوط به وجود خلل و فرج‌هایی است که در این نمونه‌ها وجود دارد. در این نمونه‌ها، در ابتدای آزمایش، نفوذ مخروط به داخل سنگ به دلیل وجود خلل و فرج در سنگ با نیروی کمتری مقابله می‌شود. در ادامه با افزایش نیرو سنگ متراکم‌تر شده و در نتیجه با نیروی بیشتر در برابر نفوذ مخروط مقابله می‌کند.



(ب)



(الف)

شکل ۶-۷. نمودار نیرو-نفوذ حاصل از آزمایش نفوذ برای دو نمونه تهیه شده از چاه‌های (الف) KrA و (ب) چاه x

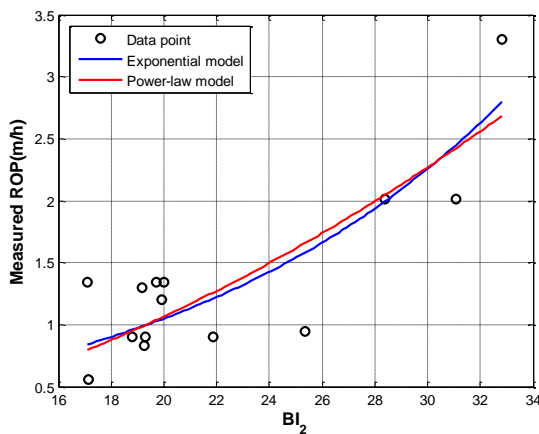
در جدول ۲-۷ مقادیر شاخص‌های استخراج شده از نمودار نیرو-نفوذ هر یک از نمونه‌های مورد آزمایش، نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود مقادیر RDI برای نمونه‌های کوچکتر تهیه شده از نمونه‌های SP1 و SP2 بسیار نزدیک به هم بوده است در حالی که در نمونه‌های مربوط به SP7 اختلاف بین مقادیر RDI نمونه‌های کوچکتر قابل اغماض نیست.

جدول ۲-۷. مقادیر شاخص‌های مختلف بدست آمده از نمودار نیرو-نفوذ برای هر نمونه به همراه نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در زمان حفاری چاه

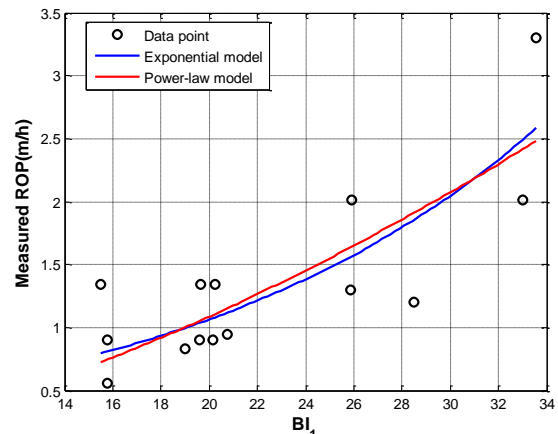
ROP (m/hr)	RDI	BI_3	BI_2	BI_1	Sub-sample ID
۱/۳۴۴	۲/۲۹۸	۳۰۰/۷۴۷	۱۷/۱۰۷	۲۰/۲۴۱	SP1-1
	۲/۳۰۷	۲۸۱/۷۴۱	۱۹/۹۸۹	۱۵/۴۷۶	SP1-2
	۲/۲۸۲	۳۱۱/۹۱۹	۱۹/۷۲۱	۱۹/۶۵۲	SP1-3
۰/۹۰۵	۱/۹۷۱	۳۲۵/۱۷۷	۱۸/۷۸۶	۱۵/۷۲۲	SP2-1
	۱/۹۸۸	۳۸۰/۰۱۴	۲۱/۸۸۶	۱۹/۶۰۳	SP2-2
	۱/۹۷۴	۳۵۲/۰۶۳	۱۹/۲۹۱	۲۰/۱۶۶	SP2-3
۰/۹۴۳	۱/۸۸۶	۴۵۶/۴۸۹	۲۵/۳۶۱	۲۰/۷۳۷	SP3-1
۰/۸۳۴	۱/۷۱۳	۴۰۶/۰۳۴	۱۹/۲۶۱	۱۹/۰۰۹	SP4-1
۳/۳۰۳	۳/۰۴۱	۲۵۸/۶۱۱	۳۲/۸۱۰	۳۳/۵۷۴	SP5-1
۰/۵۵۴	۱/۵۱۹	۴۵۵/۷۴۸	۱۷/۱۵۱	۱۵/۷۵۲	SP6-1
۲/۰۱۶	۲/۶۹۷	۴۱۵/۸۶۱	۳۱/۰۷۲	۳۲/۹۹۲	SP7-1
	۲/۴۲۵	۳۰۲/۹۴۵	۲۸/۳۸۵	۲۵/۹۰۴	SP7-2
۱/۲۹۶	۲/۱۵۲	۳۲۱/۶۵۶	۱۹/۱۸۹	۲۵/۸۵۸	SP8-1
۱/۱۹۹	۲/۰۱۸	۳۵۶/۳۱۴	۱۹/۹۲۷	۲۸/۴۸۲	SP9-1

در شکل ۷-۷ رابطه هر یک از شاخص‌های بدست آمده از نمودار نیرو-نفوذ با نرخ نفوذ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود شاخص BI_3 برخلاف سایر شاخص‌ها رابطه معکوس با

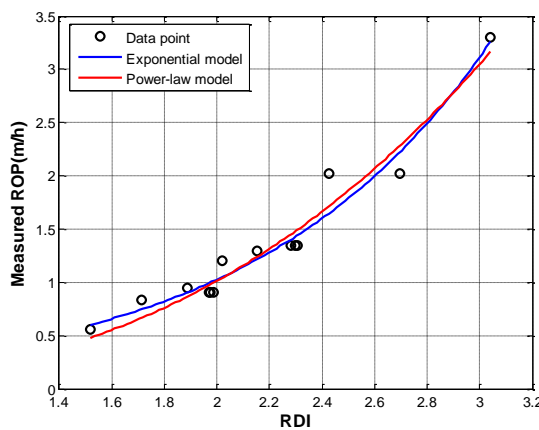
نرخ نفوذ دارد. این یافته از نظر منطقی نیز صحیح است زیرا مساحت زیر نمودار نیرو-نفوذ نشان دهنده انرژی مصرفی برای شکست سنگ است و هر چقدر انرژی مصرفی برای شکست سنگ بیشتر باشد نشان دهنده سخت بودن حفاری و یا پایین بودن قابلیت حفاری سنگ است. همانطور که در شکل مشخص است نقاط داده در شاخص RDI پراکندگی کمتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارند. در شکل ۷-۷ مشخص است که رابطه بین هر یک از شاخص‌ها و نرخ نفوذ به صورت توانی و یا نمایی است. مقایسه روابط توانی و نمایی براساس ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R-square) برای ارتباط هر یک از شاخص‌ها با نرخ نفوذ در جدول ۳-۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که رابطه نمایی در همه شاخص‌ها از خطای کمتر و ضریب همبستگی بالاتری نسبت به رابطه توانی برخوردار است.



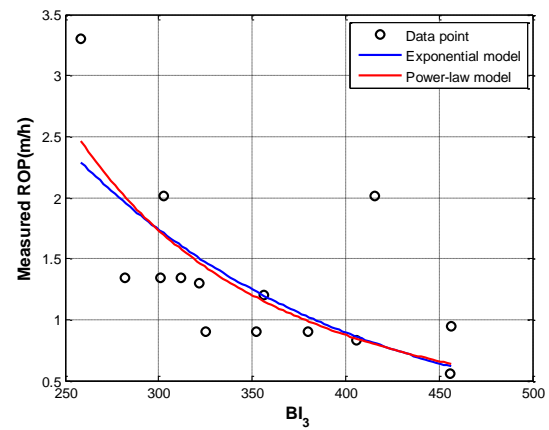
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

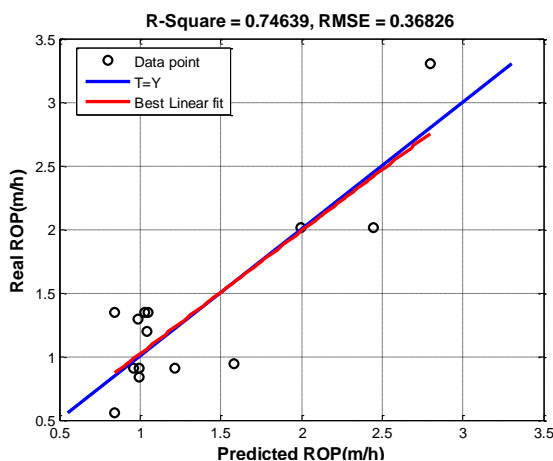
شکل ۷-۷. نمودار متقابل نرخ نفوذ و شاخص‌های محاسبه شده از نمودار نیرو-نفوذ: (الف) BI_1 ، (ب) BI_2 ، (ج) BI_3 و (د) RDI

جدول ۳-۷. مقایسه مدل‌های نمایی و توانی برازش شده برای تخمین نرخ نفوذ از شاخص‌های مستخرج

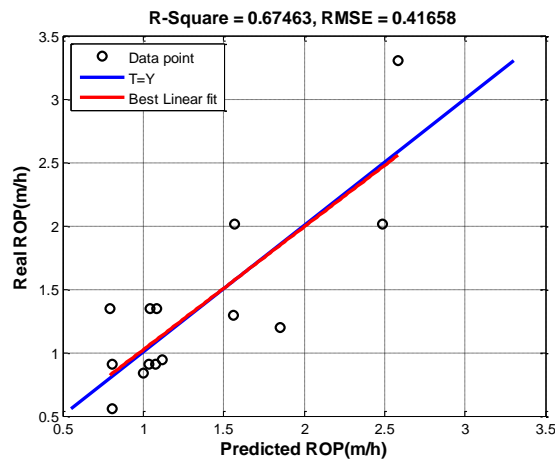
نام پارامتر	رابطه با نرخ نفوذ	R-Square	RMSE
BI_1	$ROP = 0.288 \times e^{0.065BI_1}$	۰/۶۷۵	۰/۴۱۷
	$ROP = 0.009 \times BI_1^{1.595}$	۰/۶۳۸	۰/۴۳۹
BI_2	$ROP = 0.228 \times e^{0.076BI_2}$	۰/۷۴۶	۰/۳۶۸
	$ROP = 0.003 \times BI_2^{1.865}$	۰/۷۰۶	۰/۳۹۵
BI_3	$ROP = 12.727 \times e^{-0.007BI_3}$	۰/۴۱۵	۰/۵۶۲
	$ROP = 1.344 \times 10^6 \times BI_3^{-2.378}$	۰/۴۶۳	۰/۵۱۳
RDI	$ROP = 0.111 \times e^{1.111RDI}$	۰/۹۵۷	۰/۱۵۱
	$ROP = 0.154 \times RDI^{2.717}$	۰/۹۴۹	۰/۱۶۴

شکل ۷-۸ رابطه بین نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در زمان حفاری چاه و نرخ نفوذ پیش‌بینی شده از روابط نمایی قابلیت حفاری سنگ را نشان می‌دهد. نرخ نفوذ تخمینی با استفاده از شاخص RDI از مقدار خطای کمتر و ضریب تعیین بالاتری، نسبت به نرخ نفوذ تخمینی با سه رابطه دیگر برخوردار است. هر چند نرخ نفوذ تخمینی با استفاده از شاخص BI_2 نیز رابطه خوبی را با نرخ نفوذ واقعی نشان می‌دهد؛ اما روند تغییرات بهترین خط برازش شده (شکل ۷-۸ (ب)) به گونه‌ای است که احتمال افزایش خطا در مقادیر بالای نرخ نفوذ وجود دارد و نرخ نفوذ تخمینی ممکن است کمتر تخمین زده شود.^۱

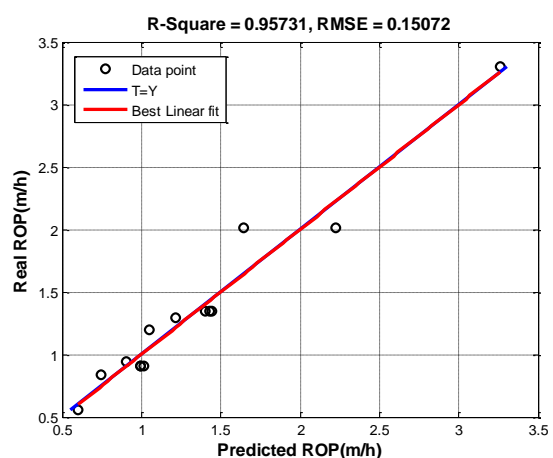
^۱ Underestimated



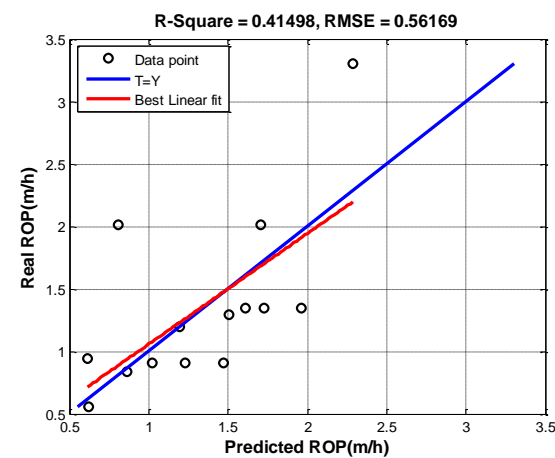
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷-۸. نمودار متقابل نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده با نرخ نفوذ تخمینی با استفاده از رابطه‌ی نمایشی بدست

آمده از شاخص‌های: (الف) BI_1 ، (ب) BI_2 ، (ج) BI_3 و (د) RDI

۷-۲-۵. تخمین شاخص قابلیت حفاری از داده‌های درون چاهی

با توجه به محدودیت‌های فرآوان در دسترسی به نمونه مغزه‌های گرفته شده از داخل چاه و همچنین، در دسترس بودن نگارهای پتروفیزیکی چاه‌های میادین نفتی و گازی، ارائه روابطی بین شاخص توسعه داده شده با نگارهای پتروفیزیکی و یا ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ می‌تواند استفاده از این شاخص را در مطالعات آینده تسهیل نماید. برای نیل به این هدف، بایستی رابطه بین مقادیر نگارهای پتروفیزیکی و ویژگی‌های ژئومکانیکی در نقاط عمقی متناظر با شاخص قابلیت حفاری سنگ بررسی شود. در جدول ۷-۴ و ۷-۵ به ترتیب مقادیر نگارهای پتروفیزیکی و ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ، به همراه مقادیر شاخص قابلیت حفاری در نقاط نمونه‌گیری ارائه شده است. با توجه به این که تعداد نقاط داده اندک است، استفاده از روش‌های هوش مصنوعی، که دقت نتایج آن‌ها مبتنی بر تعداد نقاط داده است، توصیه نمی‌شود؛ بنابراین، از روش رگرسیون چند متغیره برای توسعه رابطه‌ای بین ویژگی‌های

سنگ و شاخص قابلیت حفاری استفاده خواهد شد. البته بایستی در نظر داشت که برای مدل‌سازی رگرسیونی حتماً از چند داده برای یک نقطه عمقی میانگین گرفته شود و سپس روش رگرسیونی بر روی داده‌ها اعمال شود.

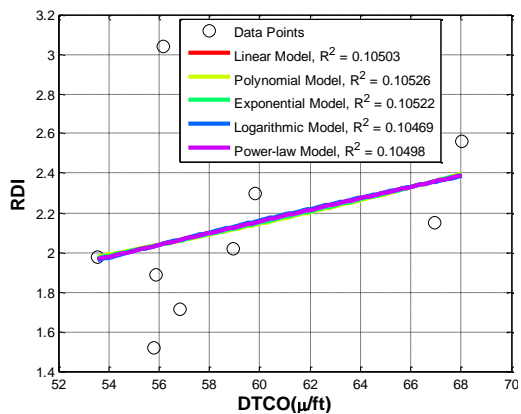
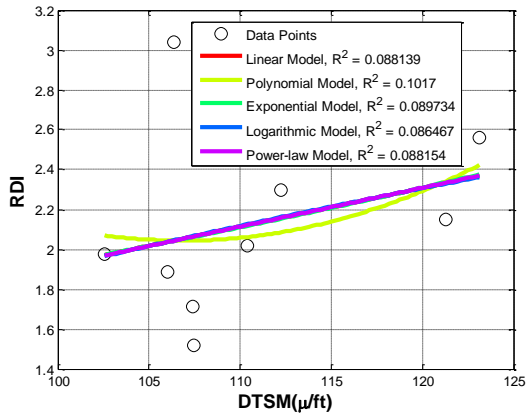
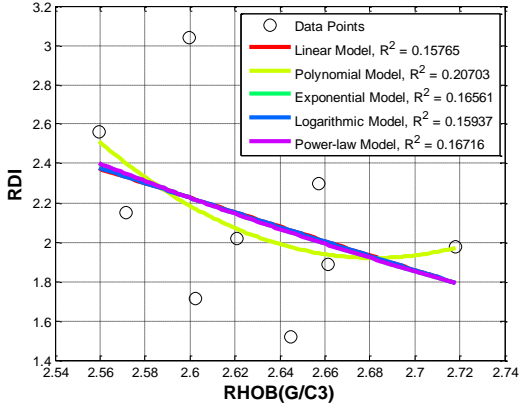
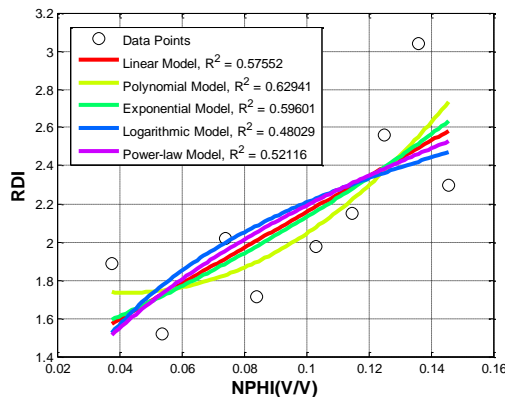
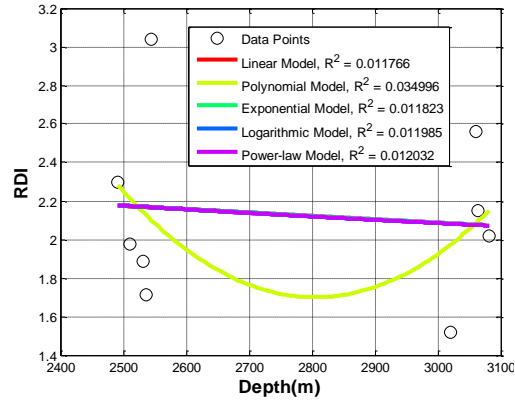
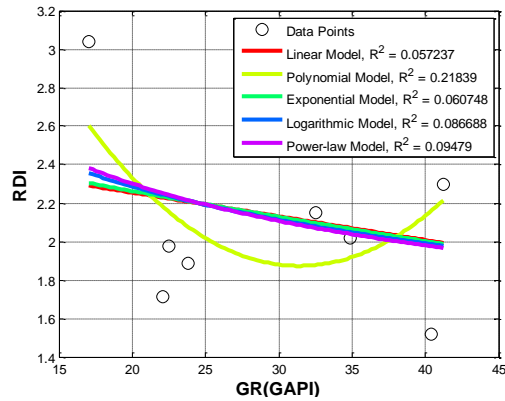
جدول ۴-۷. مقادیر نگارهای پتروفیزیکی و شاخص قابلیت حفاری در نقاط عمقی متناظر با نمونه‌های تهیه شده

RDI	DTSM ($\mu\text{s}/\text{ft}$)	DTCO ($\mu\text{s}/\text{ft}$)	NPHI (V/V)	RHOB (G/C3)	GR (GAPI)	عمق (m)
۲/۲۹۸	۱۱۲/۲۶۷	۵۹/۸۲۳	۰/۱۴۶	۲/۶۵۷	۴۱/۲۲۷	۲۴۹۱
۲/۳۰۷	۱۱۲/۲۶۷	۵۹/۸۲۳	۰/۱۴۶	۲/۶۵۷	۴۱/۲۲۷	۲۴۹۱
۲/۲۸۲	۱۱۲/۲۶۷	۵۹/۸۲۳	۰/۱۴۶	۲/۶۵۷	۴۱/۲۲۷	۲۴۹۱
۱/۹۷۱	۱۰۲/۵۴۹	۵۳/۵۴۲	۰/۱۰۳	۲/۷۱۸	۲۲/۵۲۰	۲۵۱۱
۱/۹۸۸	۱۰۲/۵۴۹	۵۳/۵۴۲	۰/۱۰۳	۲/۷۱۸	۲۲/۵۲۰	۲۵۱۱
۱/۹۷۴	۱۰۲/۵۴۹	۵۳/۵۴۲	۰/۱۰۳	۲/۷۱۸	۲۲/۵۲۰	۲۵۱۱
۱/۸۸۶	۱۰۶/۰۳۳	۵۵/۸۹۵	۰/۰۳۸	۲/۶۶۱	۲۳/۷۹۰	۲۵۳۲
۱/۷۱۳	۱۰۷/۳۸۶	۵۶/۸۲۷	۰/۰۸۴	۲/۶۰۲	۲۲/۰۶۸	۲۵۳۷
۳/۰۴۱	۱۰۶/۳۸۳	۵۶/۱۶۴	۰/۱۳۶	۲/۶۰۰	۱۷/۰۴۵	۲۵۴۵
۱/۵۱۹	۱۰۷/۴۶۶	۵۵/۸۱۳	۰/۰۵۴	۲/۶۴۵	۴۰/۳۹۳	۳۰۲۰
۲/۶۹۷	۱۲۳/۱۳۸	۶۸/۰۱۵	۰/۱۲۵	۲/۵۶۰	۳۶/۹۱۵	۳۰۶۱
۲/۴۲۵	۱۲۳/۱۳۸	۶۸/۰۱۵	۰/۱۲۵	۲/۵۶۰	۳۶/۹۱۵	۳۰۶۱
۲/۱۵۲	۱۲۱/۳۰۹	۶۶/۶۵۸	۰/۱۱۴	۲/۵۷۲	۳۲/۵۲۵	۳۰۶۴
۲/۰۱۸	۱۱۰/۴۱۳	۵۸/۹۴۸	۰/۰۷۴	۲/۶۲۱	۳۴/۹۰۷	۳۰۸۲

جدول ۷-۵. مقادیر ویژگی‌های ژئومکانیکی و شاخص قابلیت حفاری در نقاط عمقی متناظر با نمونه‌های تهیه شده

RDI	CCS (MPa)	ϕ (deg)	ν	V_{sh} (V/V)	NPHI (V/V)	RHOB (G/C3)	عمق (m)
۲/۲۹۸	۱۱۲/۷۰۶	۲۸/۰۳۹	۰/۳۰۳	۰/۲۴۱	۰/۱۴۶	۲/۶۵۷	۲۴۹۱
۲/۳۰۷	۱۱۲/۷۰۶	۲۸/۰۳۹	۰/۳۰۳	۰/۲۴۱	۰/۱۴۶	۲/۶۵۷	۲۴۹۱
۲/۲۸۲	۱۱۲/۷۰۶	۲۸/۰۳۹	۰/۳۰۳	۰/۲۴۱	۰/۱۴۶	۲/۶۵۷	۲۴۹۱
۱/۹۷۱	۱۵۹/۸۱۵	۳۲/۸۲۳	۰/۳۱۲	۰/۲۳۴	۰/۱۰۳	۲/۷۱۸	۲۵۱۱
۱/۹۸۸	۱۵۹/۸۱۵	۳۲/۸۲۳	۰/۳۱۲	۰/۲۳۴	۰/۱۰۳	۲/۷۱۸	۲۵۱۱
۱/۹۷۴	۱۵۹/۸۱۵	۳۲/۸۲۳	۰/۳۱۲	۰/۲۳۴	۰/۱۰۳	۲/۷۱۸	۲۵۱۱
۱/۸۸۶	۱۷۸/۹۸۷	۳۹/۲۷۵	۰/۳۱۱	۰/۱۰۵	۰/۰۳۸	۲/۶۶۱	۲۵۳۲
۱/۷۱۳	۱۶۴/۱۹۶	۳۵/۹۸۶	۰/۳۰۹	۰/۱۲۴	۰/۰۸۴	۲/۶۰۲	۲۵۳۷
۳/۰۴۱	۱۱۰/۱۳۸	۳۱/۷۱۵	۰/۳۰۸	۰/۱۲۲	۰/۱۳۶	۲/۶۰۰	۲۵۴۵
۱/۵۱۹	۱۸۷/۷۶۸	۳۴/۲۷۱	۰/۳۲۸	۰/۳۷۹	۰/۰۵۴	۲/۶۴۵	۳۰۲۰
۲/۶۹۷	۱۲۹/۱۰۳	۳۳/۸۴۷	۰/۳۱۶	۰/۳۲۹	۰/۱۲۵	۲/۵۶۰	۳۰۶۱
۲/۴۲۵	۱۲۹/۱۰۳	۳۳/۸۴۷	۰/۳۱۶	۰/۳۲۹	۰/۱۲۵	۲/۵۶۰	۳۰۶۱
۲/۱۵۲	۱۲۹/۹۱۲	۳۱/۰۲۵	۰/۳۰۸	۰/۲۹۴	۰/۱۱۴	۲/۵۷۲	۳۰۶۴
۲/۰۱۸	۱۵۹/۷۴	۳۵/۵۰۹	۰/۳۱۱	۰/۳۰۷	۰/۰۷۴	۲/۶۲۱	۳۰۸۲

در شکل ۷-۹ بررسی اعمال توابع برازش مختلف (شامل توابع خطی، نمایی، لگاریتمی، توانی و سهمی) به منظور تخمین شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ مخازن نفت و گاز، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، بهترین رابطه از نظر ضریب همبستگی، به صورت سهمی می‌باشد. اما بررسی مقادیر سطح معنی‌داری، نشان می‌دهد که احتمال شانس بودن این روابط بسیار بالا است. بر این اساس رابطه نمایی بین اکثر این پارامترها با قابلیت حفاری در نظر گرفته شد. همچنین در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که رابطه خوبی بین شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ و تخلخل وجود دارد، به گونه‌ای که با افزایش تخلخل مقدار قابلیت حفاری سنگ افزایش می‌یابد. این روند با نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌ها همخوانی خوبی دارد و نشان می‌دهد که هر چه ماده پرکننده بین لوله فولادی و نمونه مستحکم‌تر باشد، تخلخل سنگ نقش کلیدی را در قابلیت حفاری سنگ ایفا می‌کند.



شکل ۷-۹. ارزیابی ارتباط هر یک از نگارهای پتروفیزیکی با شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ

برای تخمین شاخص جدید قابلیت حفاری از نگارهای پتروفیزیکی، روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی قدم به قدم^۱ به کار برده شد. برای نیل به این هدف و تخصیص اوزان مناسب برای هر پارامتر در رابطه رگرسیونی، مقادیر ورودی‌ها بین صفر و یک نرمالیزه شدند. رابطه ۷-۲ نتیجه اعمال این روش با هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا^۲ و با لحاظ حاصل ضرب دو به دو نگارهای پتروفیزیکی است. البته بایستی در نظر داشت که همزمان با کمینه‌سازی خطا، سطح معنی‌داری هم در حذف و انتخاب پارامترها لحاظ و براین اساس، تنها نگار تخلخل در این مدل وارد شده است.

^۱ Linear regression model by stepwise regression

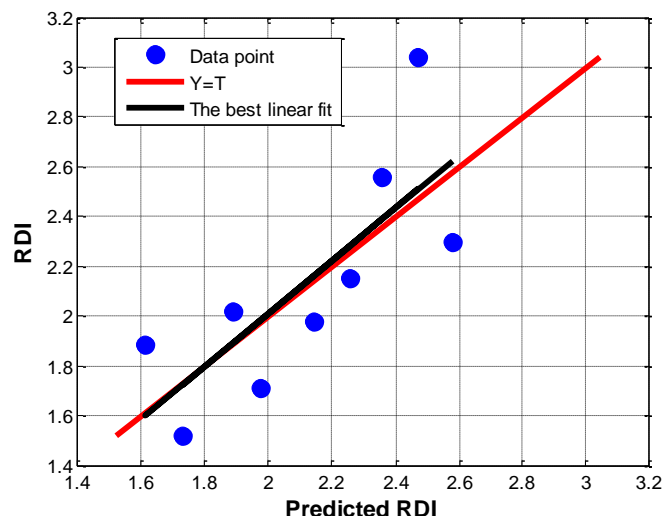
^۲ Sum Square Error (sse)

جدول ۶-۷ مقادیر ضریب تعیین، سطح معنی‌داری و خطا برای مدل برازش شده، ارائه شده است. مقدار ضریب تعیین نشان می‌دهد که این مدل تنها ۶۰ درصد از داده‌ها را می‌تواند درست برآورد نماید. در شکل ۷-۱۰ نمودار متقاطع قابلیت حفاری اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده، با استفاده از رابطه ۲-۷، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ مدل رگرسیونی ارائه شده، مقادیر قابلیت حفاری سنگ را کمتر برآورد کرده است و این پدیده با افزایش قابلیت حفاری سنگ بیشتر آشکار می‌شود.

$$\ln(RDI) = 0.478 + 0.469NPHI \quad ۲-۷$$

جدول ۶-۷. مقادیر ضرایب تعیین، سطح معنی‌داری و خطای مدل رگرسیونی برازش شده با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی

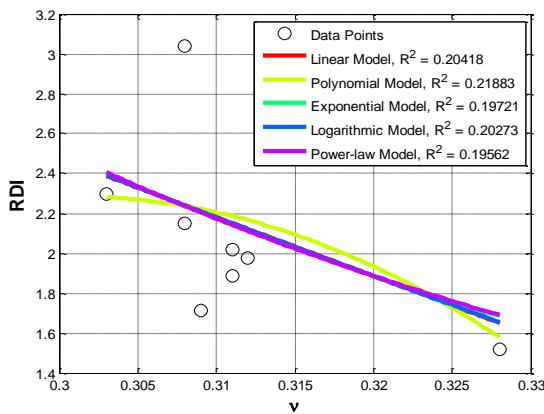
نام رابطه	R-Square	Adjusted R-Square	RMSE	P-value
۲-۷	۰/۶۰۳	۰/۵۴۶	۰/۱۴۰	۰/۰۱۳۹



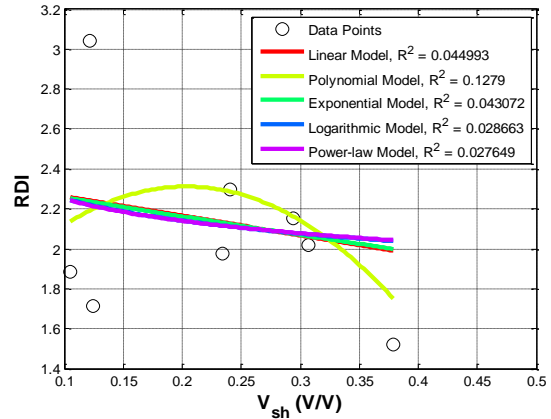
شکل ۷-۱۰. نمودار متقاطع قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی

در شکل ۷-۱۱ رابطه هر یک از ویژگی‌های سنگ با شاخص قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه نشان داده شده است. در شکل ۷-۱۱ (الف) مشاهده می‌شود که قابلیت حفاری با حجم شیل ارتباط معنی‌داری ندارد. در شکل ۷-۱۱ (ب) به نظر می‌رسد که با افزایش ضریب پواسون قابلیت حفاری سنگ کاهش می‌یابد. اما این رابطه از یک نقطه دورافتاده (ضریب پواسون ۰/۳۲۸) تأثیر پذیرفته است و حذف این نقطه داده نشان می‌دهد که ارتباطی بین ضریب پواسون و قابلیت حفاری وجود ندارد. بررسی رابطه زاویه اصطکاک داخلی با قابلیت حفاری (شکل ۷-۱۱ (ج)) نشان می‌دهد که

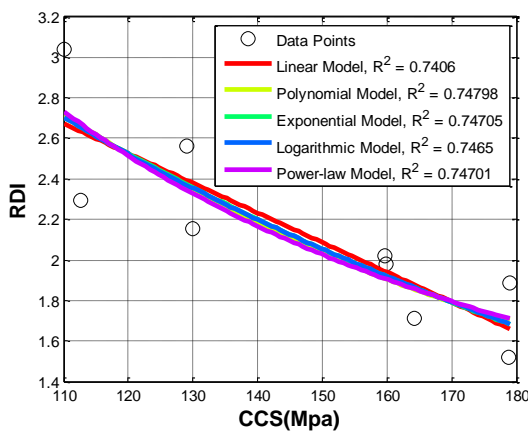
با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، قابلیت حفاری سنگ کاهش می‌یابد این رابطه نسبت به رابطه ضریب پواسون و قابلیت حفاری محکم‌تر است. در شکل ۷-۱۱ (د) مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت فشاری محصور شده، قابلیت حفاری سنگ کاهش می‌یابد. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود بهترین رابطه برازش شده به صورت سهمی می‌باشد. بررسی این تابع برازش شده در مقادیر بالای ویژگی‌های ژئومکانیکی منجر به ایجاد مقادیر منفی برای شاخص قابلیت حفاری سنگ می‌شود. از این‌رو؛ استفاده از این رابطه برای تخمین قابلیت حفاری سنگ توصیه نمی‌شود. بررسی حالت‌های مختلف دیگر توابع برازش به صورت ترکیبی از پارامترهای ژئومکانیکی نشان داد که استفاده از تابع نمایی منجر به دقت بالا در تخمین قابلیت حفاری سنگ می‌شود؛ بنابراین، روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی قدم به قدم بر روی داده‌های ژئومکانیکی (شامل: تخلخل، چگالی، حجم شیل، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری محصور شده) با هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا اعمال شد. البته برای این منظور لگاریتم در مبنای عدد طبیعی مقادیر قابلیت حفاری به عنوان پارامتر هدف در نظر گرفته شد تا تابع برازشی به صورت نمایی بر روی داده‌ها اعمال شود. رابطه ۷-۳ مدل حاصل از اعمال روش رگرسیونی چند متغیره می‌باشد. همان‌طور که در این رابطه مشاهده می‌شود رابطه قابلیت حفاری با زاویه اصطکاک داخلی به صورت مستقیم می‌باشد، یعنی افزایش زاویه موجب افزایش قابلیت حفاری سنگ خواهد شد. این در حالی است که بررسی رابطه جداگانه این پارامتر با قابلیت حفاری نشان از ارتباط معکوس آن دارد. این تغییر روابط نشان می‌دهد؛ که، قابلیت حفاری سنگ از پارامترهای مختلفی تأثیر می‌پذیرد؛ که برای رسیدن به نتیجه صحیح، بایستی ارتباط آن‌ها همزمان سنجیده شود.



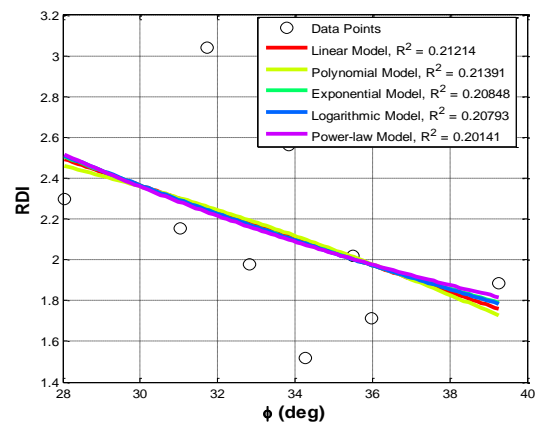
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

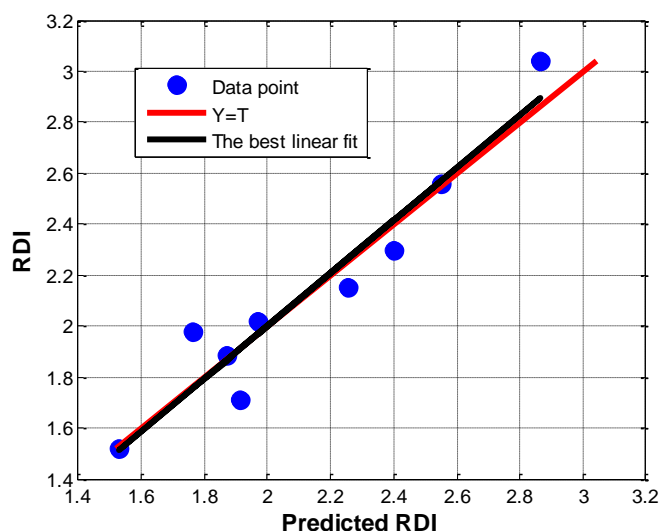
شکل ۷-۱۱. رابطه بین شاخص قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده و ویژگی‌های سنگ (الف: حجم شیل، ب: ضریب پواسون، ج: زاویه اصطکاک داخلی و د: مقاومت فشاری محصور شده) با استفاده از توابع برازش مختلف

$$\ln(RDI) = 0.903 + 0.455\phi - 0.733CCS \quad ۳-۷$$

در جدول ۷-۷ نتایج ارزیابی این رابطه برای تخمین قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده نشان داده شده است. ضریب تعیین رابطه ۳-۷ بسیار بالاتر از مقدار ضریب تعیین رابطه ۲-۷ است؛ بنابراین، استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی در تخمین قابلیت حفاری منتج به مدل‌های با دقت و قابلیت اطمینان بالاتر می‌شود. در شکل ۷-۱۲ نمودار متقاطع قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده از ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل هم مشاهده می‌شود مقدار قابلیت حفاری پیش‌بینی شده نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده آن کمتر برآورد شده است، اما این تفاوت نسبت به تفاوت دیده شده در شکل ۷-۱۰ بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است.

جدول ۷-۷. مقادیر ضرایب تعیین، سطح معنی داری و خطای مدل رگرسیونی برازش شده با استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی

نام رابطه	R-Square	Adjusted R-Square	RMSE	P-value
۳-۷	۰/۹۰۲	۰/۸۷۰	۰/۰۷۵	۰/۰۰۰۹۲۹

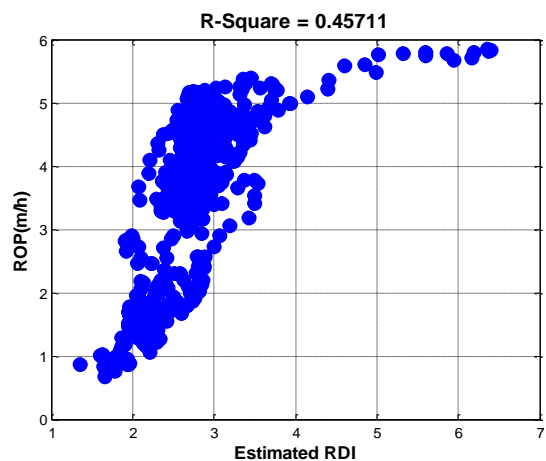


شکل ۷-۱۲. نمودار متقاطع شاخص قابلیت حفاری اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی

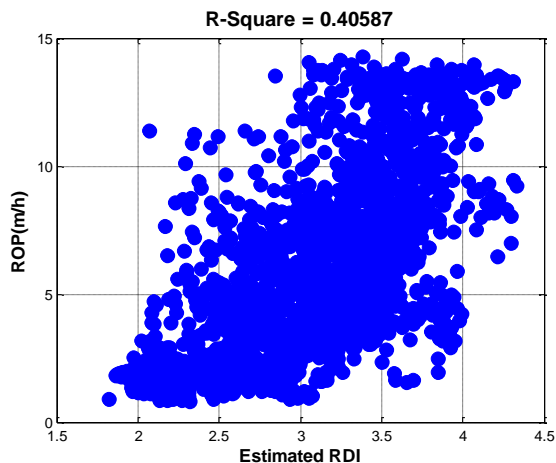
۳-۷. تخمین RDI در چاه‌های مورد مطالعه

با توجه به ارزیابی رابطه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ توسعه داده شده با نگارهای پتروفیزیکی و ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ مشخص شد که این شاخص را می‌توان با دقت بسیار خوبی از ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ برآورد نمود؛ بنابراین، در این بخش با استفاده از رابطه ۳-۷ به تخمین شاخص قابلیت حفاری در چاه‌های مورد مطالعه پرداخته خواهد شد. برای استفاده از این رابطه بایستی ورودی‌های مدل نرمالیزه شوند. در صورتی که مقادیر ورودی بین منفی یک و یک نرمالیزه شوند؛ کمترین مقدار قابلیت حفاری زمانی حاصل خواهد شد که مقدار نرمالیزه شده زاویه اصطکاک داخلی منفی یک و مقدار نرمالیزه شده مقاومت فشاری محصور شده برابر یک باشد. در این صورت مقدار قابلیت حفاری حدود ۰/۷۵ خواهد بود. مقدار بیشینه قابلیت حفاری نیز زمانی بدست خواهد آمد که مقدار نرمالیزه شده زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری محصور شده به ترتیب برابر یک و صفر باشد. در اینصورت بیشینه مقدار قابلیت حفاری ۸/۰۹ بدست خواهد آمد. البته با توجه به منطقه مورد مطالعاتی، محدوده نرمالیزه شده داده‌ها را می‌توان محدودتر (یعنی بین صفر و یک) و یا وسیعتر نمود. این قابلیت به دلیل استفاده از تابع نمایی برای ارتباط ویژگی‌های سنگ با نرخ نفوذ حاصل شده است.

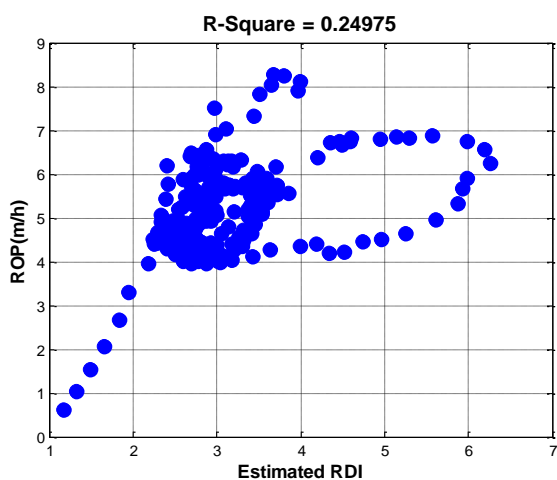
در شکل ۱۳-۷ رابطه متقابل بین نرخ نفوذ و شاخص قابلیت حفاری تخمینی، با استفاده از رابطه ۳-۷، در چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود ارتباط خوبی بین شاخص برآورد شده با نرخ نفوذ وجود دارد. در شکل ۱۳-۷ (الف) به نظر می‌رسد شاخص قابلیت حفاری رابطه‌ای نمایی یا توانی با نرخ نفوذ دارد. در چاه KTA (شکل ۱۳-۷ (ب)) با افزایش مقدار شاخص قابلیت حفاری تا حدود ۴، مقدار نرخ نفوذ با شیب تندی افزایش می‌یابد، اما در مقادیر بالاتر شاخص، شیب افزایش نرخ نفوذ کاهش می‌یابد. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که این کاهش به دلیل ریزش دیواره چاه رخ داده است. یعنی وجود سنگ‌های ریزشی در جریان حفاری نرخ حفاری را کاهش داده است، این در حالی است که ویژگی‌های سنگ حاکی از بالا بودن شاخص قابلیت حفاری ناحیه مربوطه است. در شکل ۱۳-۷ (ج) مشاهده می‌شود که به‌طور کلی نرخ حفاری به صورت توانی یا نمایی با افزایش شاخص قابلیت حفاری افزایش یافته است. هرچند در برخی مناطق عمقی به دلیل وجود مشکل حفاری این روند مشاهده نمی‌شود. این مشاهدات در نمودار چاه RSB (شکل ۱۳-۷ (د)) هم مشاهده می‌شود؛ بنابراین، می‌توان گفت که با افزایش قابلیت حفاری، نرخ حفاری افزایش می‌یابد و بررسی‌های نشان می‌دهد که این روند تغییرات به صورت نمایی است.



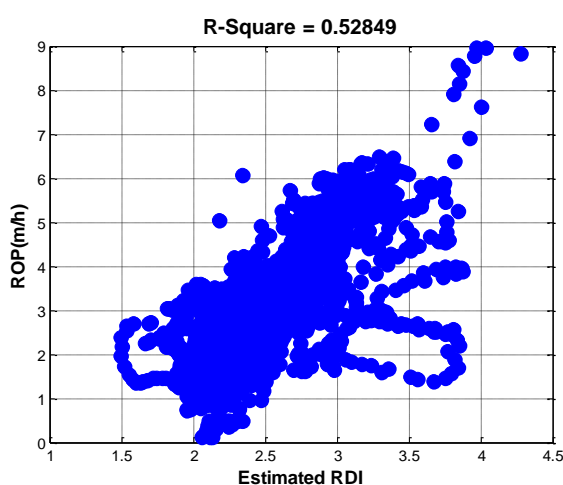
(ب)



(الف)



(د)



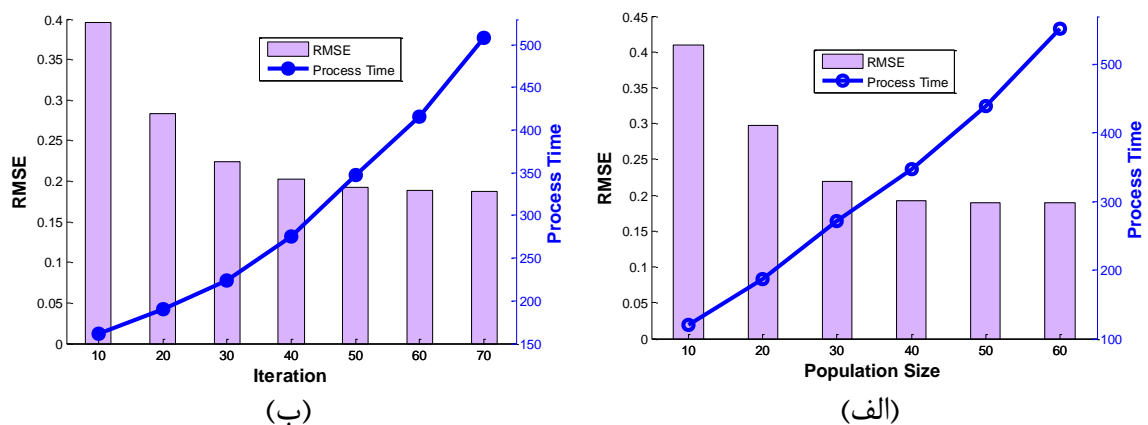
(ج)

شکل ۷-۱۳. رابطه بین نرخ نفوذ و شاخص قابلیت حفاری تخمینی برای چاه‌های (الف) AZA، (ب) KRA، (ج) RSA و (د) RSB

۷-۴. تخمین نرخ نفوذ با استفاده از شاخص جدید

به منظور تخمین نرخ حفاری با استفاده از شاخص جدید، پایگاه داده جدید، شامل پارامترهای عملیاتی و شاخص قابلیت حفاری توسعه داده شده، برای هر چاه تشکیل شد. این داده‌ها به عنوان سطح دو پایگاه داده نام‌گذاری شدند. در این بخش نیز برای انتخاب بهترین پارامترهای تأثیرگذار از میان پارامترهای سطح دو پایگاه داده در تخمین نرخ حفاری، از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شد. به منظور تعیین مقادیر بهینه تعداد تکرارها، جمعیت، نرخ تقاطع و جهش الگوریتم ژنتیک، تحلیل حساسیت بر با استفاده از داده‌های چاه‌ها انجام شد. برای نمونه در شکل ۷-۱۴ نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته برای تعیین مقادیر بهینه جمعیت و تعداد تکرارهای الگوریتم ژنتیک با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه AZA نشان داده شده است. همان‌طور که در

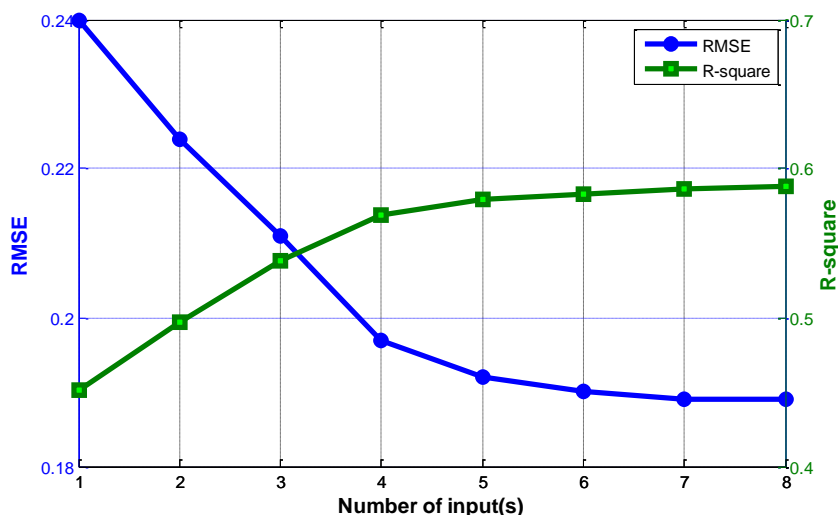
شکل ۷-۱۴ (الف) مشاهده می‌شود، بهترین مقدار برای جمعیت ژن‌ها براساس زمان پردازش و مقدار خطا برابر ۴۰ می‌باشد. بررسی مقادیر تعداد تکرارهای الگوریتم براساس زمان پردازش و دقت در شکل ۷-۱۴ (ب) نشان می‌دهد در تکرارهای بالاتر از ۵۰ مقدار کاهش خطا بسیار ناچیز و در مقابل افزایش زمان پردازش بسیار چشمگیر می‌باشد. از اینرو، تعداد تکرارهای الگوریتم ژنتیک برابر ۵۰ در نظر گرفته شد. این تحلیل حساسیت برای نرخ تقاطع و جهش نیز صورت گرفت؛ که براساس آن نرخ تقاطع و جهش به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۱ لحاظ شد. البته بایستی در نظر داشت که به منظور تخصیص وزن‌های مناسب برای هر یک از پارامترهای مورد بررسی، نیاز است داده‌ها نرمالیزه شوند. از اینرو داده‌ها بین صفر و یک نرمالیزه شدند.



شکل ۷-۱۴. نتایج تحلیل حساسیت صورت گرفته به منظور تعیین مقادیر بهینه جمعیت (الف) و تعداد تکرارها (ب) الگوریتم ژنتیک براساس داده‌های چاه AZA

در شکل ۷-۱۵ مقایسه ضرایب تعیین و خطای مدل تخمین‌گر نرخ حفاری با توجه به تعداد ورودی-های مختلف انتخابی از سطح دوم پایگاه داده چاه AZA نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ با افزایش تعداد ورودی‌های مدل، ضریب تعیین و خطای مدل به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. نرخ این تغییرات در خطا و ضریب تعیین، با افزایش تعداد ورودی‌ها روندی کاهشی داشته است. همچنین، مشاهده می‌شود که از تعداد ورودی‌های مشخصی به بعد این تغییرات ناچیز است.

نمودار تغییرات خطا و ضریب همبستگی به ازای انتخاب تعداد ورودی‌های مختلف برای مدل تخمین-گر نرخ حفاری با استفاده از داده‌های سطح دوم سایر چاه‌ها در پیوست ارائه شده است (شکل ۹-۹ برای چاه KfA، شکل ۹-۲۲ برای چاه RSA و شکل ۹-۳۵ برای چاه RSB). تحلیل‌های صورت گرفته در این بخش برای این چاه‌ها نیز انجام شد.



شکل ۷-۱۵. نتایج الگوریتم انتخاب ویژگی برای داده‌های سطح دو چاه AZA

پارامترهای انتخاب شده به ازای تعداد ورودی‌ها در الگوریتم انتخاب ویژگی به عنوان جواب‌های نامغلوب در جدول ۷-۸ ارائه شده است. در این جدول مشاهده می‌شود که شاخص قابلیت حفاری ارائه شده به عنوان اولین پارامتری است که انتخاب شده است و این گویای این مطلب است که ویژگی‌های سازند نسبت به سایر پارامترهای حفاری تأثیر بیشتری دارد. همچنین؛ می‌توان دریافت که این شاخص به خوبی نشان دهنده وزن اثر پارامترهای سازند در نرخ حفاری است. خطای تخمین نرخ نفوذ برای مدل‌هایی با هفت و هشت تعداد ورودی تفاوتی ندارد در حالی که ضریب تعیین آن مدل هشتم افزایش جزئی نشان می‌دهد. عدم تغییر مقدار خطا در این افزایش تعداد ورودی به علت عدم تأثیر پارامتر اضافه شده در دقت مدل تخمین‌گر است. با توجه به روند تغییرات مقادیر خطا با افزایش تعداد ورودی، مدل تخمین‌گر با پنج پارامتر ورودی برای پیش‌بینی نرخ حفاری در مراحل بعد با استفاده از روش‌های رگرسیون و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه انتخاب شد.

پارامترهای انتخاب شده براساس تعداد ورودی‌های مختلف مدل تخمین‌گر برای داده‌های سطح دوم سایر چاه‌ها در بخش پیوست ارائه شده است (جدول ۹-۹ برای چاه KfA، جدول ۹-۲۰ برای چاه RSA و جدول ۹-۳۱ برای چاه RSB).

جدول ۷-۸. نتیجه اعمال الگوریتم انتخاب ویژگی روی داده‌های سطح دوم چاه Aza (ویژگی‌های انتخاب شده با خط پررنگ نمایش داده شده است)

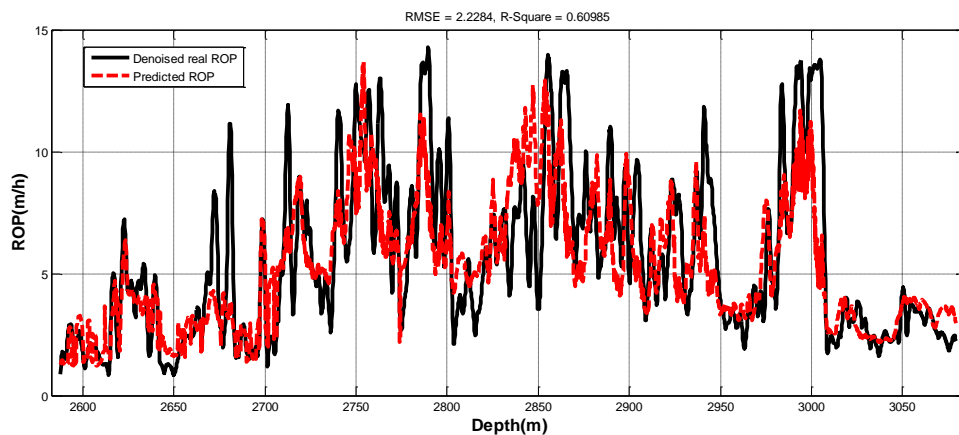
R-Square	RMSE	نوع ورودی‌ها	تعداد ورودی‌ها
۰/۴۵۱	۰/۲۴۰	RDI	۱
۰/۴۹۷	۰/۲۲۴	RDI, RPM	۲
۰/۵۳۸	۰/۲۱۱	RDI, RPM, FR	۳
۰/۵۶۹	۰/۱۹۷	RDI, RPM, FR, WOB	۴
۰/۵۷۹	۰/۱۹۳	RDI, RPM, FR, WOB, CT	۵
۰/۵۸۳	۰/۱۹۰	RDI, RPM, FR, WOB, CT, ECD	۶
۰/۵۸۶	۰/۱۸۹	RDI, RPM, FR, WOB, CT, ECD, PuP	۷
۰/۵۸۸	۰/۱۸۹	RDI, RPM, FR, WOB, CT, ECD, PuP, MD	۸

۷-۴-۱. روش رگرسیون چند متغیره

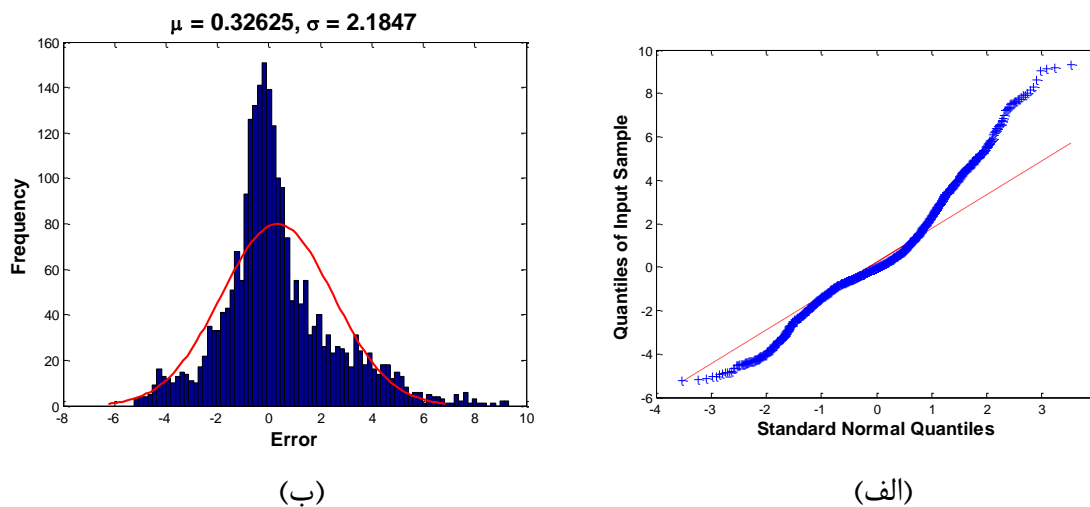
در این بخش برای تخمین نرخ حفاری با استفاده از پارامترهای انتخاب شده (یعنی شاخص قابلیت حفاری، سرعت دوران، نرخ جریان، وزن روی مته و سائیدگی دندان مته) در مرحله انتخاب ویژگی، از روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی گام به گام استفاده خواهد شد. برای اعمال این روش، علاوه بر خود پارامترها، حاصل ضرب دوتایی آن‌ها نیز مد نظر قرار گرفت. روش رگرسیون با هدف کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا و انتخاب ویژگی‌هایی با سطح اطمینان زیر پنج صدم بر روی داده‌ها اعمال شد. بررسی توابع مختلف به منظور تخمین نرخ حفاری با استفاده از این روش نشان داد که در تابع نمایی منجر به نتایجی با دقت بالا و منطقی می‌شود. در جدول ۹-۱۰ مدل رگرسیونی حاصل همراه با دقت و ضریب تعیین آورده شده است. مقایسه دقت و قابلیت اطمینان این مدل با مدل شماره ۳ سطح اول (حاصل از روش رگرسیونی) نشان دهنده عملکرد خوب شاخص قابلیت حفاری در افزایش دقت مدل-های تخمین گر سرعت حفاری است. مقایسه نرخ حفاری نوفه زدایی شده و تخمینی با استفاده از مدل شماره ۴ در شکل ۷-۱۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مدل به خوبی روند تغییرات نرخ حفاری را پیش‌بینی کرده است. بررسی خطای باقی‌مانده برای مدل شماره ۴ در شکل ۷-۱۷ با استفاده از نمودارهای q-q و توزیع فراوانی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ توزیع فراوانی خطا تقریباً به صورت نرمال است که به سمت راست چولگی دارد.

جدول ۷-۹. مدل حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح دو چاه AZA

نام مدل	رابطه	R-Square	RMSE
مدل شماره ۴	$\ln(ROP) = -0.7486 + 0.2412RDI - 0.2317CT - 0.0538WOB$ $+ 0.0189RPM + 0.0011FR + CT$ $\times (0.0693RDI - 0.0056WOB - 0.00033RPM)$ $+ FR \times (0.00018WOB - 3.027 \times 10^{-5}RPM)$	۰/۶۱۰	۲/۲۲۸



شکل ۷-۱۶. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی با استفاده از پارامترهای انتخاب شده از سطح دو چاه AZA



شکل ۷-۱۷. مقایسه نمودار (الف) q-q و (ب) توزیع فراوانی خطا

مدل حاصل از اعمال روش رگرسیونی بر روی داده‌های سطح دوم سایر چاه‌های مورد مطالعه در بخش پیوست اشاره شده است (جدول ۹-۱۰ برای چاه KrA، جدول ۹-۲۱ برای چاه RSA و جدول ۹-۳۲ برای چاه RSB). مقایسه مقادیر تخمینی از این مدل‌ها و نرخ نفوذ واقعی نرمالیزه شده در ادامه این جداول نشان داده شده است (شکل ۹-۱۰ برای چاه KrA، شکل ۹-۲۳ برای چاه RSA و شکل ۹-۳۶ برای چاه RSB). تحلیل خطای باقیمانده این مدل‌ها در ادامه ارائه شده است (شکل ۹-۱۱ برای چاه

KrA, شکل ۹-۲۴ برای چاه RSA و شکل ۹-۳۷ برای چاه RSB) تحلیل‌های انجام شده برای مدل شماره ۴ چاه AZA، بر روی این مدل‌ها نیز انجام گرفت.

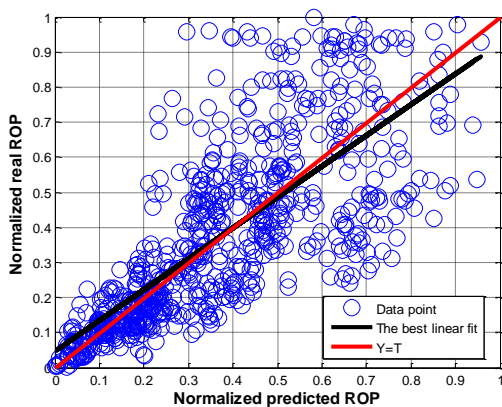
۷-۴-۲. شبکه عصبی پرسپترون چند لایه

در این بخش برای تخمین نرخ نفوذ با استفاده از پنج پارامتر انتخاب شده، از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده خواهد شد. با توجه به همگرایی سریع الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در تعیین مقادیر بهینه مسئله، مدل شبکه عصبی با این الگوریتم آموزش داده خواهد شد. مقادیر پارامترهای الگوریتم فاخته برای آموزش مدل همانند بخش ۶-۳-۱-۲ در نظر گرفته شد. بدین صورت مقایسه بین نتایج مدل‌های شبکه عصبی سطح اول و دوم در شرایط برابر انجام خواهد شد.

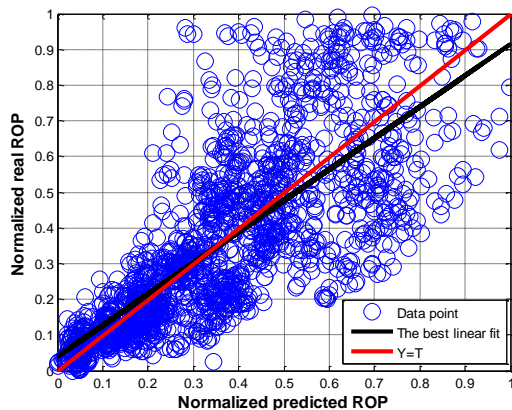
در جدول ۷-۱۰ مقایسه مرحله آموزش و آزمون شبکه عصبی تلفیقی با الگوریتم فاخته براساس پارامترهای انتخاب شده از پایگاه داده سطح دوم چاه AZA نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود دقت مدل حاصل نسبت به مدل‌های ارائه شده قبلی در این چاه بهبود یافته است. این بهبودی نشان از عملکرد خوب شاخص معرفی شده به عنوان قابلیت حفاری سازند می‌باشد. در شکل ۷-۱۸ نمودار متقاطع نرخ نفوذ تخمینی و مشاهده شده در چاه AZA نشان داده شده است. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ تخمینی و مشاهده شده در طول عمق این چاه در شکل ۷-۱۹ نشان می‌دهد؛ که مدل ایجاد شده به خوبی توانسته است تغییرات نرخ نفوذ را پیش‌بینی نماید.

جدول ۷-۱۰. نتایج حاصل از اعمال شبکه عصبی بهینه شده بر روی داده‌های سطح دو چاه AZA

مرحله	R-square	RMSE
آموزش	۰/۶۴۶	۰/۱۴۸
آزمون	۰/۶۴۱	۰/۱۵۷

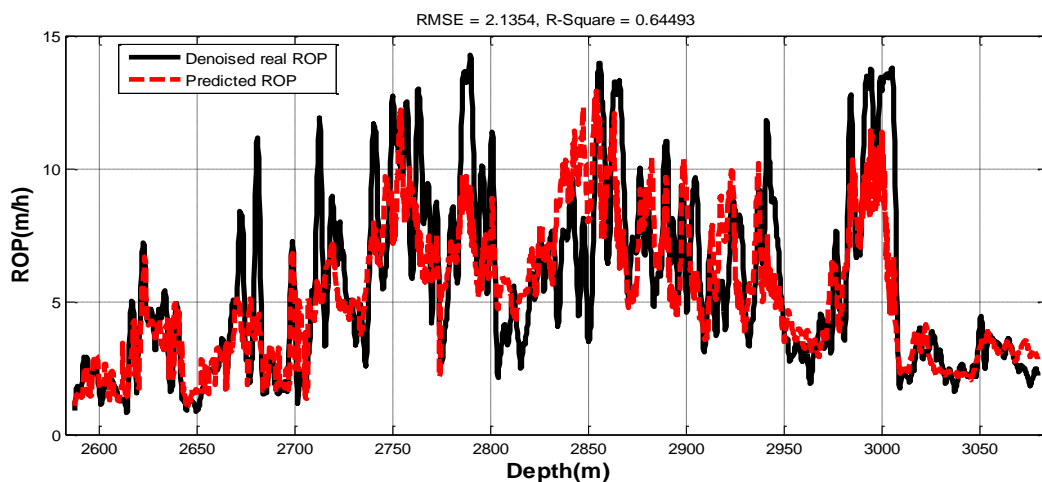


(ب)



(الف)

شکل ۷-۱۸. مقایسه نمودار متقاطع مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA حاصل از داده‌های سطح دوم چاه AZA



شکل ۷-۱۹. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی با شبکه عصبی بهینه شده از داده‌های سطح دو چاه AZA

مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA اعمالی بر روی داده‌های سطح دوم سایر چاه‌های مورد مطالعاتی در بخش پیوست ارائه شده است (جدول ۹-۱۱ برای چاه KrA، جدول ۹-۲۲ برای چاه RSA و جدول ۹-۳۳ برای چاه RSB). نمودار متقاطع مقادیر این مدل‌ها در مرحله آموزش و آزمون نیز در ادامه پیوست نشان داده شده است (شکل ۹-۱۲ برای چاه KrA، شکل ۹-۲۵ برای چاه RSA و شکل ۹-۳۸ برای چاه RSB). مقایسه نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA در این چاه‌ها نیز در بخش پیوست ارائه شده است (شکل ۹-۱۳ برای چاه KrA، شکل ۹-۲۶ برای چاه RSA و شکل ۹-۳۹ برای چاه RSB). تحلیل‌های انجام شده در این بخش بر روی نتایج حاصل از اعمال مدل MLP-COA روی داده‌های سطح دوم این چاه‌ها نیز انجام گرفت.

۵-۷. اعتبارسنجی مدل‌های نرخ نفوذ مبتنی بر شاخص جدید

به منظور اعتبارسنجی مدل‌های نرخ نفوذ جدید ارائه شده بر پایه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ، دو روش در پیش گرفته خواهد شد. در روش اول، از مدل‌های شبکه عصبی ایجاد شده برای هر چاه به منظور تخمین نرخ حفاری در چاه‌های دیگر استفاده خواهد شد. در روش دوم، مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌های نرخ نفوذ شماره ۴ هر چاه و مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ هر چاه انجام خواهد شد. در ادامه هر یک از این روش‌های به تفکیک شرح و بر روی داده‌ها پیاده خواهد شد.

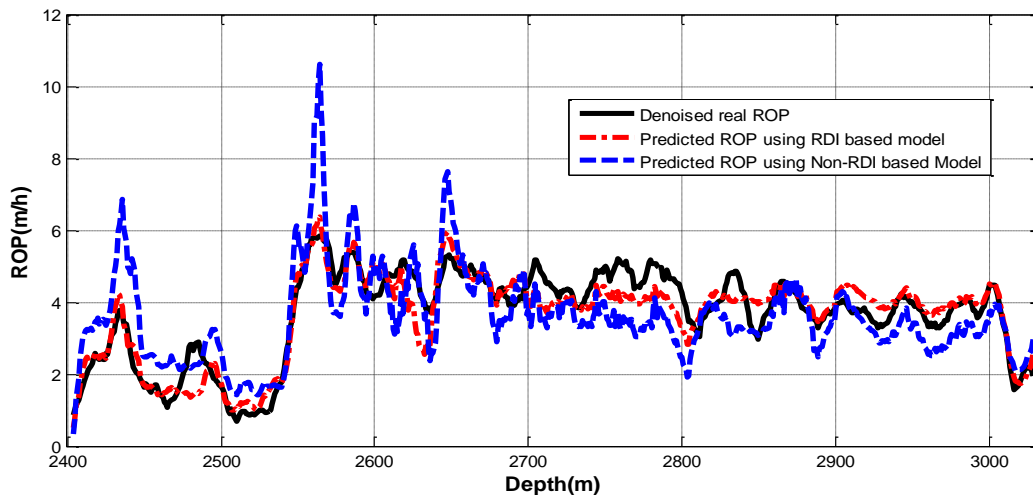
۱-۵-۷. آزمون مدل‌های نرخ نفوذ سطح دوم در چاه‌های دیگر

از آنجایی که دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های نرخ نفوذ MLP-COA در هر چاه مورد مطالعه نسبت به مدل‌های رگرسیونی بهتر بوده است، در اینجا برای تخمین نرخ نفوذ در سایر چاه‌ها، از این مدل‌ها استفاده خواهد شد. برای مقایسه نتایج مدل‌های نرخ نفوذ مبتنی بر شاخص جدید قابلیت حفاری، همزمان از مدل MLP-COA ایجاد شده برای پایگاه شماره ۳ سطح اول داده نیز در تخمین سرعت حفاری استفاده خواهد شد. از میان چاه‌های مورد مطالعه، از چاه RSB به علت عدم تغییر در مقادیر سرعت دوران در این بخش نظر خواهد شد. بکارگیری مدل‌های آموزش دیده در چاه‌های مختلف نشان داد که نتایج این مدل‌ها برای تخمین نرخ نفوذ در چاه دیگر بسیار متاثر از تعداد داده‌ای است که بر مبنای آن مورد آموزش قرار گرفته است. از اینرو در اینجا تنها از مدل‌های چاه AZA و RSA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KrA استفاده خواهد شد.

در جدول ۷-۱۱، مقایسه نتایج بکارگیری دو مدل آموزش دیده چاه AZA برای تخمین نرخ حفاری چاه KrA ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل مبتنی بر قابلیت حفاری نسبت به مدل دیگر از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است. در شکل ۷-۲۰ به کارگیری مدل آموزش دیده با استفاده از داده‌های چاه AZA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KrA نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل مبتنی بر قابلیت حفاری توسعه داده شده نتایج بهتری را نسبت به مدل MLP-COA ایجاد شده با استفاده از پارامترهای انتخاب شده پایگاه داده سوم سطح اول چاه AZA ارائه کرده است.

جدول ۷-۱۱. نتایج حاصل از مدل‌های آموزش دیده در چاه AZA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KrA

نام مدل	R-square	RMSE
مدل مبتنی بر قابلیت حفاری	۰/۸۴۱	۰/۴۸۶
مدل مبتنی بر پارامترهای ژئومکانیک	۰/۵۶۷	۰/۶۱۸

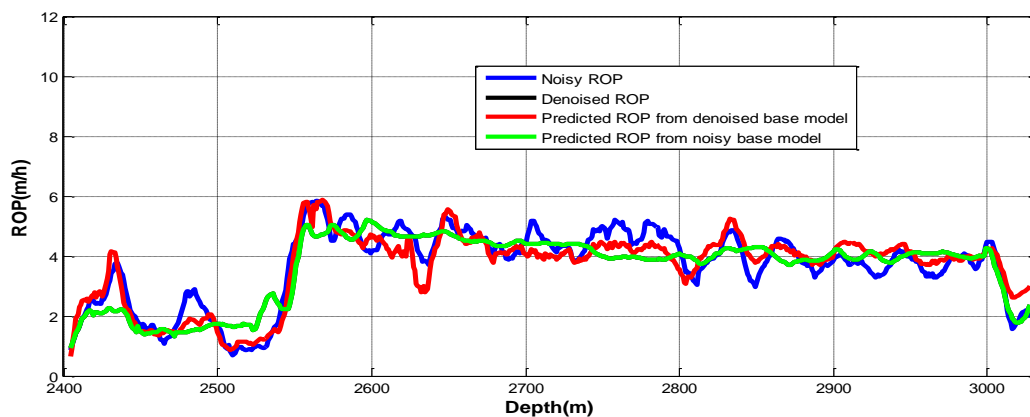


شکل ۷-۲۰. بکارگیری مدل‌های آموزش دیده در چاه Aza برای تخمین نرخ حفاری در چاه KrA

در جدول ۷-۱۲ نتایج بکارگیری دو مدل آموزش دیده با استفاده از داده‌های چاه RSA در چاه KrA اشاره شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مدل مبتنی بر قابلیت حفاری نتایجی دقیق‌تری ارائه داده است. این نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های مبتنی بر قابلیت حفاری از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار هستند. در شکل ۷-۲۱، مقایسه مقادیر نرخ نفوذ تخمینی از داده‌های چاه KrA با دو مدل آموزش دیده در چاه RSA نشان داده شده است. هر دو نرخ نفوذ تخمینی روند کلی تغییرات نرخ نفوذ واقعی را به خوبی پیش‌بینی کرده‌اند.

جدول ۷-۱۲. نتایج حاصل از مدل‌های آموزش دیده در چاه RSA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KrA

RMSE	R-square	نام مدل
۰/۴۸۴	۰/۸۵۰	مدل مبتنی بر قابلیت حفاری
۰/۵۴۹	۰/۷۴۳	مدل مبتنی بر پارامترهای ژئومکانیک



شکل ۷-۲۱. بکارگیری مدل‌های آموزش دیده در چاه RSA برای تخمین نرخ حفاری در چاه KrA

با توجه به اینکه برخلاف چاه RSA، پارامتر گشتاور در داده‌های چاه AZA وجود ندارد، براین اساس اثر وجود این پارامتر در تخمین نرخ حفاری بررسی شد. نتایج این تحلیل نشان داد که دقت بالای نتایج مدل چاه RSA در تخمین نرخ حفاری چاه KfA به علت وجود این پارامتر است. با مقایسه نتایج جدول ۷-۱۱ و جدول ۷-۱۲ نشان می‌دهد که تأثیر این پارامتر در صورت وجود قابلیت حفاری زیاد چشمگیر نیست. اما در صورت استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی به جای قابلیت حفاری، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای بین دقت مدل‌های مبتنی بر پارامترهای ژئومکانیک ایجاد می‌شود. این تحلیل‌ها حاکی از آن است که رابطه قابلیت حفاری توسعه داده شده با نرخ نفوذ قوی‌تر از ارتباط گشتاور با نرخ نفوذ است.

۷-۵-۲. مقایسه بین مدل‌های نرخ نفوذ بورگوین و یانگ و شماره ۴

به منظور تخمین نرخ نفوذ با استفاده از مدل بورگوین و یانگ، بایستی مقادیر ضرایب ثابت مدل با توجه به شرایط حفاری چاه و نوع سازند تعیین شوند. از آنجایی که الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در تعیین مقادیر بهینه این ضرایب نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی بسیار قدرتمند عمل می‌کند (Anemangely et al., 2017a)، این الگوریتم برای این منظور به کار گرفته شد. برای نیل به این هدف پارامترهای الگوریتم با استفاده از روش آزمون و خطا تعیین شد. بهترین مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای تعداد جمعیت فاخته، بیشینه جمعیت فاخته و تعداد تکرارهای الگوریتم در جدول ۷-۱۳ ارائه شده است. مقادیر ضرایب ثابت مدل بورگوین و یانگ بدست آمده با اعمال این الگوریتم روی داده‌های هر سازند در جدول ۷-۱۴ نشان داده شده است. هرچند بورگوین و یانگ (۱۹۷۴) محدوده‌ای را، براساس مطالعاتی که روی چندین چاه انجام داده‌اند، برای هر یک از ضرایب ثابت پیشنهاد دادند. اما در این پژوهش، در مدل بورگوین و یانگ دو حالت برای ضرایب ثابت در نظر گرفته شد که حالت اول تعریف محدوده تغییرات برای هر یک از ضرایب ثابت و حالت دوم نامحدود در نظر گرفتن محدوده تغییرات هر یک از ضرایب ثابت می‌باشد. بررسی این دو حالت نشان داد که در چاه-های مورد مطالعه مقادیر بهینه این ضرایب در محدوده پیشنهادی بورگوین و یانگ واقع نمی‌شود. از اینرو محدوده‌ای برای این ضرایب در الگوریتم فاخته تعریف نشد و محدوده تغییرات آن‌ها نامتناهی فرض شد.

جدول ۷-۱۳. مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای الگوریتم فاخته بر مبنای روش آزمون و خطا

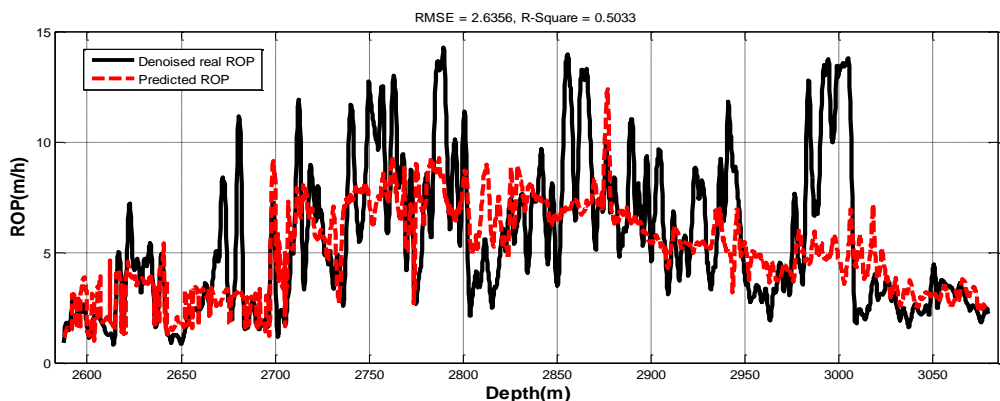
نام چاه	سازند	جمعیت فاخته	بیشینه جمعیت فاخته	تعداد تکرار
AzA	آسماری	۵۰	۶۰	۳۰
	پابده	۵۰	۶۰	۳۰
KrA	آسماری	۵۰	۵۰	۲۰
	پابده	۵۰	۵۰	۲۰
RSA	پابده	۶۰	۷۰	۳۰
	سروک	۶۰	۷۰	۳۰
RSB	آسماری	۴۰	۴۰	۲۰

جدول ۷-۱۴. مقادیر ضرایب ثابت مدل بورگوین و یانگ حاصل از الگوریتم فاخته به تفکیک سازندهای هر

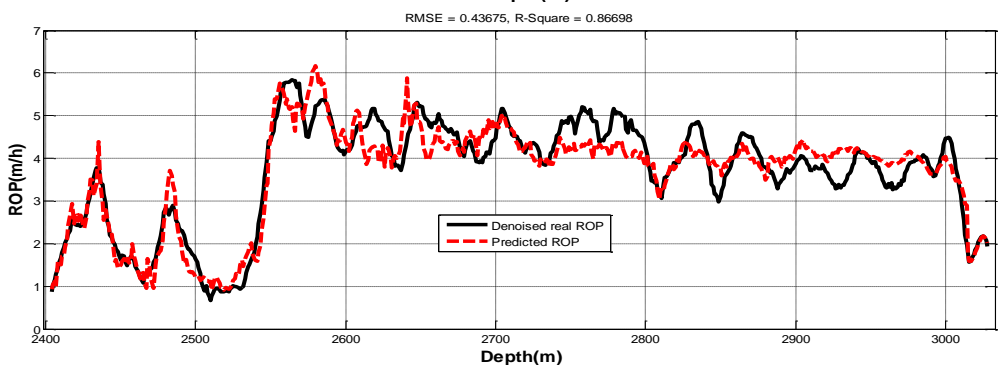
چاه

نام چاه	سازند	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
AzA	آسماری	۳/۰۹۱	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۸	۱/۳۷۴	۲/۰۱۸	۰/۱۸۵۳	۰/۲۷۵
	پابده	۲/۴۸۳	۰/۰۰۰۰۸۶	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳۲	۱/۰۹۵	۱/۷۱۱	۰/۱۸۱۹	۱/۱۷۰
KrA	آسماری	۱/۸۸۴	۰/۰۰۰۰۸۵	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۰۰۷۴	۱/۴۱۲	۲/۸۸۹	۰/۲۷۴	۰/۷۶۹
	پابده	۲/۰۲۸	۰/۰۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۵۷	۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۹۰۳	۱/۸۱۳	۰/۴۷۳	۰/۵۴۹
RSA	پابده	۳/۲۷۱	۰/۰۰۰۰۵۲	۰/۰۰۰۰۲۴	۰/۰۰۰۰۶۹	۱/۵۷۰	۲/۴۱۹	۰/۶۲۷	۰/۳۱۱
	سروک	۲/۲۲۵	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۰۰۸	۱/۶۶۵	۲/۳۳۷	۰/۹۱۲	۱/۰۸۹
RSB	آسماری	۱/۸۱۷	۰/۰۰۰۰۴۲	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۰۰۶۲	۱/۴۷۹	۲/۴۲۸	۰/۷۹۱	۰/۸۸۷

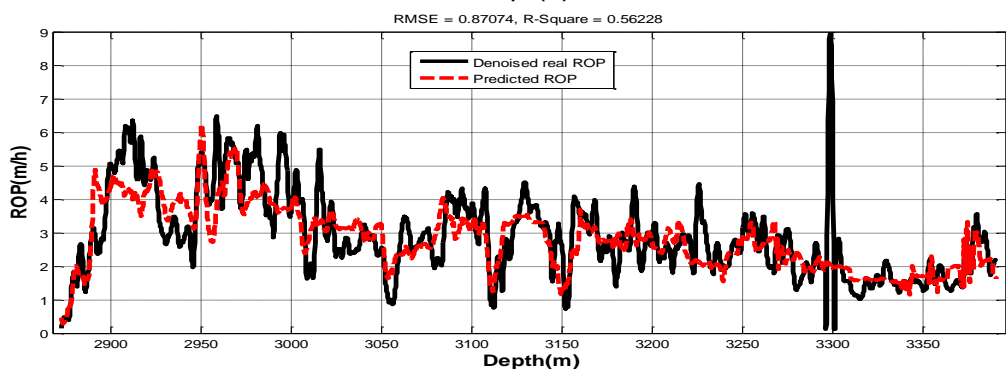
در شکل ۷-۲۲ نرخ نفوذ واقعی در کنار نرخ نفوذ تخمینی در فواصل عمقی مورد مطالعه در هر چاه نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود مدل بورگوین و یانگ با دقت خوبی نرخ حفاری را در چاه‌های مورد مطالعه برآورد کرده است. اما این دقت به دلیل استفاده از ۹ پارامتر مختلف است که محاسبه برخی از این پارامترها بسیار دشوار و نیازمند انجام آزمون‌های درون چاهی است. مقایسه نتایج مدل بورگوین و یانگ در هر چاه با مدل شماره ۴ متناظر هر چاه نشان از عملکرد بهتر مدل‌های ارائه شده با استفاده از قابلیت حفاری توسعه داده شده نسبت به مدل بورگوین و یانگ است. این در حالی است که در مدل‌های شماره ۴، تنها با استفاده از ۵ پارامتر که می‌توان آن‌ها را به راحتی محاسبه و تهیه نمود به دقت و قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به مدل بورگوین و یانگ رسید.



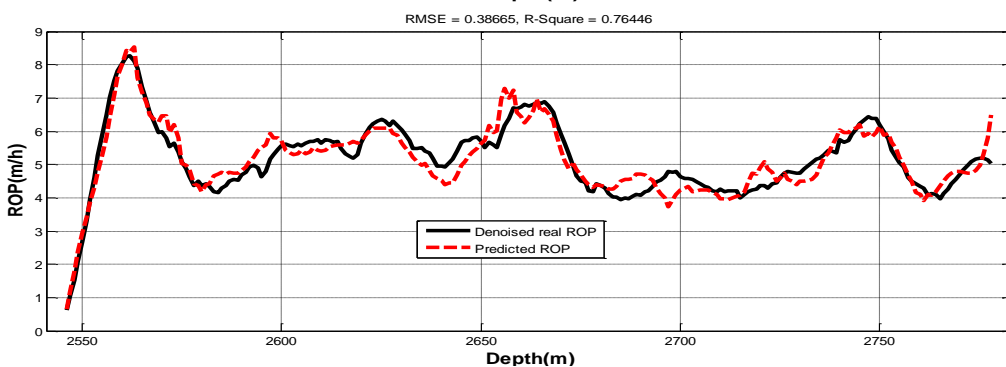
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷-۲۲. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل بورگوین و یانگ برای چاه‌های (الف) AZA، (ب) KrA، (ج) RSA و (د) RSB

۶-۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل به منظور تعیین شاخص قابلیت حفاری سنگ از آزمایش نفوذ نفوذگر استفاده شد. بدین منظور، تعداد نه نمونه مغزه از دو چاه فراهم شد. به دلیل این‌که، هیچ استاندارد برای ابعاد نمونه

مورد آزمایش در این آزمون تعریف نشده است؛ به منظور مشخص کردن حداقل ابعاد نمونه مورد آزمایش، نمونه‌هایی با سه شکل استوانه، نیم و ربع استوانه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج ارزیابی نمودار نیرو-نفوذ این نمونه‌ها نشان داد که مقادیر شاخص‌های استخراجی بسیار نزدیک به هم می‌باشند. از اینرو، نه نمونه به ابعاد یک چهارم استوانه تقسیم شدند. با توجه به شکستگی برخی از نمونه‌های تهیه شده، از انجام آزمایش روی آن نمونه‌های خودداری شد. به منظور ایجاد شرایط ته چاه، از ترکیب سیمان و گچ به عنوان مواد پرکننده بین نمونه و لوله فولادی استفاده شد. این در حالی است که در کاربردهای عمرانی آزمایش نفوذگر، از گچ به عنوان ماده پرکننده استفاده می‌شود. علاوه بر سه شاخص تردی، شاخص جدیدی به نام شاخص قابلیت حفاری از نمودار نیرو-نفوذ نمونه‌ها استخراج شد. بررسی رابطه هر یک از این شاخص‌ها با نرخ نفوذ نشان داد که شاخص قابلیت حفاری ارتباط خوبی را نسبت به سایر شاخص‌ها با نرخ نفوذ دارد. از اینرو؛ در ادامه، برای تخمین قابلیت حفاری رابطه بین نگارهای پتروفیزیکی با شاخص قابلیت حفاری و همچنین رابطه بین ویژگی‌های ژئومکانیکی با شاخص قابلیت حفاری ارزیابی شد. مقایسه نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود و تنها با استفاده از دو پارامتر مقاومت فشاری محصور شده و زاویه اصطکاک داخلی می‌توان شاخص قابلیت حفاری جدید را تخمین زد. از این رابطه برای تخمین شاخص قابلیت حفاری در چاه‌ها استفاده شد. با استفاده از شاخص قابلیت حفاری هر چاه همراه با پارامترهای عملیاتی، پایگاه سطح دوم چاه ایجاد شد. بکارگیری الگوریتم انتخاب ویژگی بر روی داده‌های سطح دوم هر چاه نشان داد که شاخص قابلیت حفاری در اولویت اول انتخاب برای مدل‌سازی نرخ حفاری قرار دارد. این مطلب بیان می‌دارد که تأثیر شاخص قابلیت حفاری بر روی نرخ حفاری حتی از پارامترهای عملیاتی نیز بیشتر است و شاخص جدید می‌تواند به خوبی راحتی یا سختی حفر یک سازند را نشان دهد. با توجه به این که کاهش خطا از پنج پارامتر ورودی به بعد بسیار ناچیز است، لذا این تعداد پارامتر از داده‌های سطح دوم هر چاه برای مدل‌سازی نرخ نفوذ انتخاب شد. مقایسه میان خطای مدل‌های رگرسیونی شماره ۳، شماره ۴ و مدل بورگوین و یانگ در جدول ۷-۱۵ اشاره شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مدل نرخ نفوذ شماره ۴ که مبتنی بر شاخص قابلیت حفاری است؛ نسبت به دو مدل دیگر از خطای کمتری در هر یک از چاه‌های مورد مطالعه برخوردار است.

جدول ۷-۱۵. مقایسه خطای مدل شماره ۴ با مدل‌های شماره ۳ و بورگوین و یانگ در چاه‌های مورد مطالعه

نام چاه	مدل بورگوین و یانگ	مدل شماره ۳	مدل شماره ۴	درصد بهبودی خطای مدل شماره ۴ نسبت به خطای	
				مدل بورگوین و یانگ	مدل شماره ۳
AzA	۲/۶۳۶	۲/۳۵۲	۲/۲۲۸	۱۵/۴۷۸	۵/۲۷۲
KrA	۰/۸۶۷	۰/۴۸۳	۰/۳۵۰	۵۹/۶۳۱	۲۷/۵۳۶
RSA	۰/۸۷۱	۰/۸۱۳	۰/۷۰۷	۱۸/۸۲۹	۱۳/۰۳۸
RSB	۰/۳۸۷	۰/۴۰۱	۰/۳۳۲	۱۴/۲۱۲	۱۷/۲۰۷

در جدول ۷-۱۶ خطای تخمین نرخ حفاری براساس مدل‌های شبکه عصبی ایجاد شده با استفاده از داده‌های پایگاه شماره سوم از سطح اول و داده‌های سطح دوم مقایسه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود خطای مدل ایجاد شده براساس داده‌های سطح دوم پایگاه داده نسبت به مدل دیگر به مراتب کمتر است.

جدول ۷-۱۶. مقایسه خطای مدل‌های شبکه عصبی حاصل از پایگاه داده سطح دوم و پایگاه داده سوم

سطح اول در چاه‌های مورد مطالعه

نام چاه	مدل پایگاه داده سوم سطح اول	مدل پایگاه داده دوم سطح دوم	درصد بهبودی خطای مدل پایگاه داده سطح دوم نسبت به مدل پایگاه داده سوم سطح اول
AzA	۲/۲۲۴	۲/۱۳۵	۴/۰۰۲
KrA	۰/۴۱۵	۰/۲۰۶	۵۰/۳۶۱
RSA	۰/۷۶۹	۰/۶۰۳	۲۱/۵۸۶
RSB	۰/۳۱۲	۰/۲۰۰	۳۵/۸۹۷

مقایسه خطای مدل‌های نرخ نفوذ مبتنی بر داده‌های سطح دوم در روش‌های رگرسیونی و شبکه عصبی در جدول ۷-۱۵ و ۷-۱۶، نشان دهنده کارایی بهتر شبکه عصبی در تخمین نرخ حفاری است. علاوه بر این، اختلاف کم بین خطای مرحله آموزش و آزمون مدل شبکه عصبی بیان‌گر قابلیت اطمینان بالا در بکارگیری این مدل‌ها نسبت به روش رگرسیونی است.

فصل هشتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۸-۱. مقدمه

هدف از این مطالعه، توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ مبتنی بر نرخ نفوذ حفاری می‌باشد. برای نیل به این هدف، داده‌های چهار چاه از سه میدان مختلف در جنوب غربی ایران گردآوری شد. در ادامه، برای محاسبه ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ، مدل‌سازی یک بعدی چاه انجام شد. سطح اول پایگاه داده بعد از همسان‌سازی مقیاس داده‌ها تشکیل شد. در ادامه مدل‌سازی نرخ نفوذ با استفاده از رگرسیون چند متغیره غیرخطی و شبکه عصبی پرسپترون چند لایه برای شناسایی اهمیت ویژگی‌های سنگ در افزایش دقت مدل‌های تخمین‌گر بر روی داده‌های سطح اول انجام شد. سپس از آزمایش نفوذ نفوذگر به منظور استخراج شاخص‌های مرتبط با قابلیت حفاری سنگ استفاده شد. ارزیابی ارتباط شاخص‌های مختلف با نرخ حفاری مشاهده شده نشان داد که شاخص جدید ارتباط خوبی را با نرخ نفوذ دارد. بدین دلیل، این شاخص به عنوان قابلیت حفاری سنگ انتخاب شد. در ادامه از ویژگی‌های سنگ‌ها برای تخمین شاخص قابلیت توسعه داده شده بهره برده شد. سپس با استفاده از رابطه بدست آمده، به تخمین قابلیت حفاری سنگ در چاه‌های مورد مطالعه پرداخته شد. به منظور ارزیابی کارایی شاخص جدید قابلیت حفاری، مدل نرخ نفوذی مبتنی بر آن در چاه‌های مورد مطالعه ایجاد و با نتایج مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ مقایسه شد. در ادامه نتیجه‌گیری و پیشنهادات حاصل از این مطالعه ارائه شده است.

۸-۲. نتیجه‌گیری

در این بخش یافته‌های حاصل از انجام این مطالعه براساس فصول ارائه شده در رساله اشاره خواهد شد. لازم به ذکر است که نتایج ارائه شده در این بخش براساس مشاهدات و داده‌های چاه‌های مورد مطالعه است؛ لذا، در استفاده از روابط ارائه شده در این رساله به محدودیت‌های موجود دقت شود.

- مدل‌سازی یک بعدی چاه

➤ با توجه به عدم وجود نگار صوتی برشی در چاه‌های مورد مطالعه، از تلفیق روش سیستم استنتاج عصبی- فازی سازگار با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات و با استفاده از داده‌های دو چاه مدل‌سازی انجام شد. مقایسه دقت مدل‌ها در مرحله آموزش و آزمون نشان از قابلیت اطمینان بالای مدل‌های ایجاد شده در تخمین نگار کندی موج برشی می‌باشد. نگار صوتی برشی در چاه‌های مورد مطالعه با استفاده از این مدل‌ها برآورد شد.

- نتایج حاصل از معیار موهر-کلمب و هوک-براون هم‌خوانی خوبی با مشاهدات درون چاهی حاصل از نگار کالیپر نشان داد. در این میان، مطابقت بیشتری بین معیار شکست هوک-براون با مشاهدات درون چاهی مشاهده شد.
- معیار موهر-کلمب نسبت به معیار هوک-براون در تخمین حداقل فشار گل لازم برای جلوگیری از شکست برشی محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌کند.
- علائم وجود شکستگی در محدوده عمقی مورد مطالعه در همه چاه‌ها با استفاده از داده‌های هرزروی تشخیص داده شد. به دلیل عدم هم‌خوانی نتایج دو معیار شکست با این علائم، نگارهای تصویری برای شناسایی و تعیین نوع شکستگی‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این تحلیل نشان داد که وجود شکستگی‌های باز طبیعی به دلیل بالا بودن فشار سیال حفاری نسبت به فشار سازندی عامل این هرزروی بوده است.

- پیش‌پردازش داده

- بررسی نمودار جعبه‌ای، تحلیل طیفی و همبستگی خودکار پارامترهای مورد مطالعه نشان داد که داده‌های گردآوری شده به نوفه آغشته می‌باشند و شدت آن‌ها در داده‌های مربوط به ویژگی‌های سنگ بیشتر است.
- بررسی ضریب همبستگی بین پارامترهای ورودی مدل‌های تخمین‌گر نشان داد که بسیاری از پارامترهای محاسبه شده سنگ از روی نگارهای پتروفیزیکی هم‌خطی شدیدی دارند. این هم‌خطی‌ها با استفاده از روش ماتریس ضرایب همبستگی شناسایی و حذف شدند.
- بررسی رابطه هر یک از ویژگی‌های سنگ با نرخ نفوذ در چاه‌های مورد مطالعه نشان داد که پارامترهای مکانیک سنگ ارتباط بهتری را نسبت به نگارهای پتروفیزیکی با نرخ نفوذ دارند. از میان این ویژگی‌ها، مقاومت فشاری محصور شده همبستگی بالایی با نرخ نفوذ دارد.
- روش جستجوی افزودن l ، حذف r به منظور انتخاب ویژگی‌های برتر در تخمین نرخ نفوذ بر روی داده‌های چاه‌های مورد مطالعه اعمال شد. نتایج به کارگیری این الگوریتم نشان داد که با افزایش ورودی‌های مدل، خطای مدل کاهش و ضریب همبستگی افزایش می‌یابد. اما شیب این تغییرات، با افزایش تعداد ورودی‌ها کاهش می‌یابد.

- مدل‌سازی نرخ نفوذ

- دقت مدل‌های رگرسیونی شماره ۲ و ۳ نسبت به مدل شماره ۱ سطح اول پایگاه داده چاه‌ها به طور میانگین، به ترتیب، ۷ و ۱۳ درصد افزایش یافته است؛ که نشان می‌دهد، استفاده از

پارامترهای ژئومکانیکی به جای نگارهای پتروفیزیکی در مدل‌های نرخ نفوذ به عنوان مشخصات سازندی مناسب‌تر می‌باشد.

➤ مقایسه بین نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با الگوریتم لونبرگ-مارکوت در آموزش شبکه عصبی نشان داد که مدل شبکه عصبی-فاخته از دقت و قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است.

➤ مقایسه خطای مدل‌های شبکه عصبی ایجاد شده با استفاده از داده‌های پایگاه‌های شماره ۲ و ۳ نسبت به پایگاه شماره ۱ سطح اول داده در چاه‌های مورد مطالعه، به ترتیب، حاکی از کاهش ۱۳ و ۱۸ درصدی به صورت میانگین می‌باشد. این کاهش چشمگیر خطا به منزله تأثیر قابل توجه پارامترهای سازندی در نرخ حفاری می‌باشد.

➤ مقایسه بین خطای مدل‌های شبکه عصبی و رگرسیونی برای هر یک از پایگاه‌های داده سطح اول نشان داد که دقت مدل شبکه عصبی نسبت به مدل رگرسیونی متناظر در پایگاه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ چاه‌های مورد مطالعه به طور میانگین، به ترتیب، ۶، ۱۲ و ۱۱ درصد می‌باشد. این اختلاف چشمگیر حاکی از عملکرد بهتر شبکه عصبی پرسپترون چند لایه در تخمین نرخ حفاری می‌باشد.

- توسعه شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ

➤ دست‌یابی به یک نتیجه قابل اطمینان در آزمایش نفوذ، نیازمند داشتن تعداد نقاط داده بیشتر و انجام آزمون‌های بیشتری برای هر نقطه داده می‌باشد. به دلیل وجود محدودیت در دریافت نمونه مغزه در مطالعات نفتی و همچنین عدم وجود دستورالعمل تعریف شده مشترک در تهیه نمونه‌های آزمایش نفوذ، ایده تقسیم نمونه‌ها به ابعادی کوچکتر مطرح شد. مقایسه نتایج آزمایش نفوذ روی نمونه‌هایی با ابعاد مختلف نشان داد که اختلاف مقادیر تردی استخراج شده برای این نمونه‌ها ناچیز می‌باشد. بنابراین، هر نمونه استوانه‌ای به چهار نمونه کوچکتر تقسیم شد.

➤ سه شاخص تردی به همراه شاخص جدید قابلیت حفاری از نمودارهای نیرو-نفوذ استخراج شد. ارزیابی رابطه بین هر یک از این شاخص‌ها با نرخ نفوذ نشان داد که رابطه‌نمایی بهترین رابطه برای تخمین نرخ نفوذ از شاخص‌های بدست آمده می‌باشد.

➤ مقایسه خطای روابط نمایی برازش شده بین شاخص‌های بدست آمده از آزمایش نفوذ و نرخ حفاری، بیانگر دقت بالای شاخص جدید قابلیت حفاری توسعه داده شده در تخمین نرخ حفاری می‌باشد.

➤ به منظور تخمین شاخص قابلیت حفاری توسعه داده شده، با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره غیرخطی رابطه این شاخص با نگرهای پتروفیزیکی و ویژگی‌های ژئومکانیکی ارزیابی شد. نتایج این ارزیابی نشان داد که این شاخص را می‌توان با استفاده از دو پارامتر مقاومت فشاری محصور شده و زاویه اصطکاک داخلی سنگ با دقت خوبی تخمین زد. از اینرو رابطه ۱-۸ که دارای ضریب تعیین 0.903 در چاه مورد مطالعاتی بود؛ به عنوان مدل تخمین‌گر شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ برای چاه‌هایی با شرایط جدول ۱-۸ پیشنهاد می‌شود. قبل از استفاده از این رابطه، داده‌های ورودی بایستی بین $[-10]$ نرمالیزه شوند. البته بایستی در نظر داشت که این رابطه براساس داده‌های سازندهای آسماری، پابده و سروک ارائه شده است.

$$\ln(RDI) = 0.903 + 0.455\phi - 0.733CCS \quad 1-8$$

جدول ۱-۸. شرایط مورد نیاز به منظور استفاده از رابطه ۱-۸ در چاه‌های مورد بررسی

نام پارامتر	حداقل مقدار	حداکثر مقدار
عمق (m)	۲۴۰.۴	۳۳۹۱
تخلخل (V/V)	۰/۰۰۱	۰/۳۴۸
فشار منفذی (MPa)	۱۸	۲۹
چگالی (G/C3)	۲/۱۵	۲/۸۶
زاویه اصطکاک داخلی (deg)	۲۰	۴۹
مقاومت تک محوری (Mpa)	۱۰	۱۱۶
مقاومت فشاری محصور شده (MPa)	۳۴	۲۴۷

➤ بررسی رابطه شاخص قابلیت حفاری تخمینی با نرخ نفوذ مشاهده شده در چاه‌های مورد مطالعه نشان داد که از ضریب همبستگی بالاتری، نسبت به ارتباط سایر پارامترها با نرخ نفوذ، برخوردار است.

➤ انجام انتخاب ویژگی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب بر روی داده‌های سطح دوم چاه‌ها، نشان داد که شاخص قابلیت حفاری تخمینی به عنوان اولویت اول انتخاب در مدل‌های نرخ حفاری وارد می‌شود. این امر نشان می‌دهد که شاخص جدید می‌تواند به خوبی نقش پارامترهای سازندی را به عنوان قابلیت حفاری در مدل نرخ نفوذ نشان دهد.

➤ بکارگیری شاخص جدید قابلیت حفاری در مدل‌های رگرسیونی نشان داد که دقت این مدل‌ها به صورت میانگین ۱۶ درصد نسبت به مدل شماره ۳ سطح اول داده چاه‌ها افزایش یافته

است. این بهبود چشمگیر در دقت مدل‌های تخمین‌گر نرخ حفاری، بیان‌گر عملکرد خوب شاخص جدید قابلیت حفاری ارائه شده است.

➤ مقایسه میان دقت مدل‌های نرخ نفوذ رگرسیونی مبتنی بر شاخص جدید قابلیت حفاری با مدل نرخ نفوذ بورگوین و یانگ در تخمین نرخ حفاری چاه‌های مورد مطالعه نشان داد، که دقت مدل‌های پیشنهادی به صورت میانگین ۲۷ درصد نسبت به مدل بورگوین و یانگ بیشتر می‌باشد. براساس مقایسه انجام شده، روابط ۲-۸ و ۳-۸ به عنوان مدل نرخ نفوذ پیشنهادی می‌باشند؛ که می‌توانند برای تخمین سرعت حفاری در سازندهای مشابه چاه‌های دیگر به کار روند. تفاوت این دو رابطه در بکارگیری گشتاور به عنوان پارامتر ورودی می‌باشد. ضرایب a_i در این روابط بایستی براساس شرایط میدان و چاه مورد مطالعه تعیین شود.

$$\ln(ROP) = a_1 + a_2RDI + a_3CT + a_4WOB + a_5RPM + a_6FR + CT \times (a_7RDI + a_8WOB + a_9RPM) + FR \times (a_{10}WOB + a_{11}RPM) \quad 2-8$$

$$\ln(ROP) = a_1 + a_2RDI + a_3Tor + a_4WOB + a_5RPM + a_6FR + RDI \times (a_7Tor + a_8WOB + a_9RPM + a_{10}FR) + Tor \times (a_{11}WOB + a_{12}RPM) + a_{13}WOB \times RPM \quad 3-8$$

➤ دقت مدل‌های سطح دوم پایگاه داده به طور میانگین حدود ۲۸ درصد نسبت به مدل‌های پایگاه داده سوم سطح اول بهبود یافته است. این افزایش دقت در مدل‌های سطح دوم گویای کارایی خوب شاخص معرفی شده در تخمین قابلیت حفاری سنگ می‌باشد.

➤ بکارگیری شبکه عصبی در مدل‌سازی نرخ حفاری با استفاده از داده‌های سطح دوم پایگاه داده، خطای تخمین را به میزان ۲۵ درصد نسبت به استفاده از روش رگرسیونی کاهش داد. به این دلیل استفاده از روش‌های هوشمند در تخمین نرخ حفاری توصیه می‌شود.

۳-۸. پیشنهادات

➤ توسعه مدلی که قابلیت استفاده در اکثر مطالعات را داشته باشد نیازمند استفاده از تنوع اطلاعات بیشتری است؛ از اینرو، استفاده از اطلاعات چاه‌های بیشتر در میادین مختلف می‌تواند نتایج این مطالعه را معتبرتر و قابل‌تعمیم‌تر سازد.

➤ وجود اطلاعات بیشتری از چاه‌ها نظیر آزمایش‌های درون چاهی به منظور کالیبره‌سازی مدل ژئومکانیکی چاه می‌تواند دقت نتایج حاصل از مدل را بهبود دهد.

➤ یکی از نکات کلیدی در تلفیق داده‌هایی با مقیاس گوناگون، همسان‌سازی مقیاس داده‌ها می‌باشد. در این مطالعه از روش میانگین‌گیری برای بزرگ‌نمایی مقیاس داده‌ها استفاده شده است. بررسی اثر روش‌های بهبود یافته‌تر مانند تبدیل موجک با رزولیشن چندگانه در بزرگ-

نمایی مقیاس داده‌ها و در توسعه رابطه تخمین شاخص قابلیت حفاری، می‌تواند موضوع مطالعات آتی باشد.

➤ امروزه تبدیل موجک به عنوان ابزاری ارزشمند در نوفه‌زدایی شناخته شده است. بکارگیری این روش در نوفه‌زدایی و مقایسه نتایج آن با روش ساویتزکی-گولایی می‌تواند به عنوان موضوعی برای تحقیق باشد.

➤ استفاده از شبکه عصبی توابع شعاعی پایه و رگرسیون بردار پشتیبان می‌تواند به عنوان موضوعی در تخمین نرخ حفاری مطرح شود. استفاده از روش سیستم استنتاج فازی-عصبی سازگار^۱ به دلیل کمک در درک چگونگی اثر هر کدام از پارامترها بر روی نرخ نفوذ می‌تواند موضوع بسیار خوبی در این زمینه باشد.

➤ یکی از محدودیت‌های این مطالعه، تعداد اندک مغزه در انجام آزمایش نفوذ نفوذگر است. استفاده از تعداد مغزه‌های بیشتر می‌تواند منجر به ارائه نتایجی دقیق‌تر و مدلی با قابلیت تعمیم بیشتر شود.

➤ وجود آب در نمونه سنگ می‌تواند باعث کاهش مقادیر ویژگی‌های مکانیکی سنگ شود. از اینرو، به نظر می‌رسد میزان اشباع شدگی و نوع سیال منفذی در مقادیر شاخص‌های حاصل از آزمایش نفوذ تأثیرگذار باشد.

➤ با افزایش شاخص ساینده سنگ نرخ حفاری کاهش می‌یابد. بنابراین، به کارگیری این پارامتر همراه با شاخص‌های بدست آمده از آزمایش نفوذ می‌تواند در تخمین دقیق‌تر قابلیت حفاری سنگ کمک نماید.

➤ استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در تخمین شاخص قابلیت حفاری ارائه شده از ویژگی-های سنگ می‌تواند دقت تخمین را بهبود دهد. البته انجام این مدل‌سازی ملزم به داشتن تعداد نقاط داده بیشتری می‌باشد. علاوه بر این چگونگی اثر پارامترهای ورودی بر روی نرخ نفوذ از طریق سیستم استنتاج فازی عصبی سازگار قابل ارزیابی است.

➤ بکارگیری شاخص جدید قابلیت حفاری سنگ پیشنهاد شده برای طبقه‌بندی سازندها و ارائه الگویی برای انتخاب مته مناسب براساس آن، می‌تواند به عنوان موضوع پژوهشی در مطالعات آتی مطرح شود.

➤ بررسی رابطه بین شاخص قابلیت حفاری و انرژی ویژه حفاری می‌تواند در تخمین قابلیت حفاری سنگ‌های واقع در بالای مخزن، که هیچ گونه اطلاعاتی در آنها برداشت نمی‌شود؛

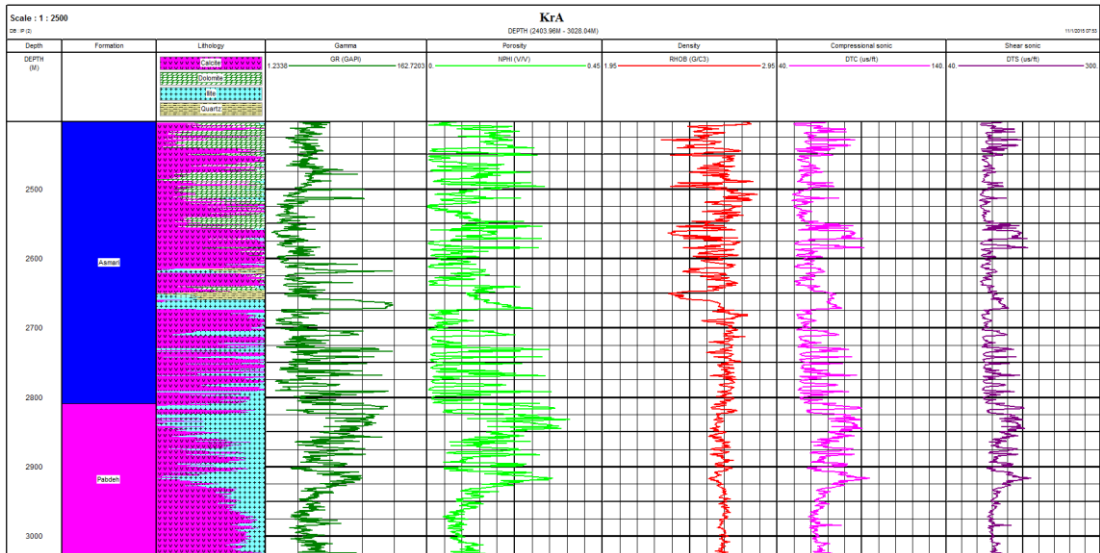
¹ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

کمک شایانی نماید. در نتیجه انجام این کار، می‌توان برنامه‌ریزی صحیحی برای انجام فرآیند حفاری نمود و از رخداد بسیاری از مشکلات در زمان حفاری چاه جلوگیری نمود.

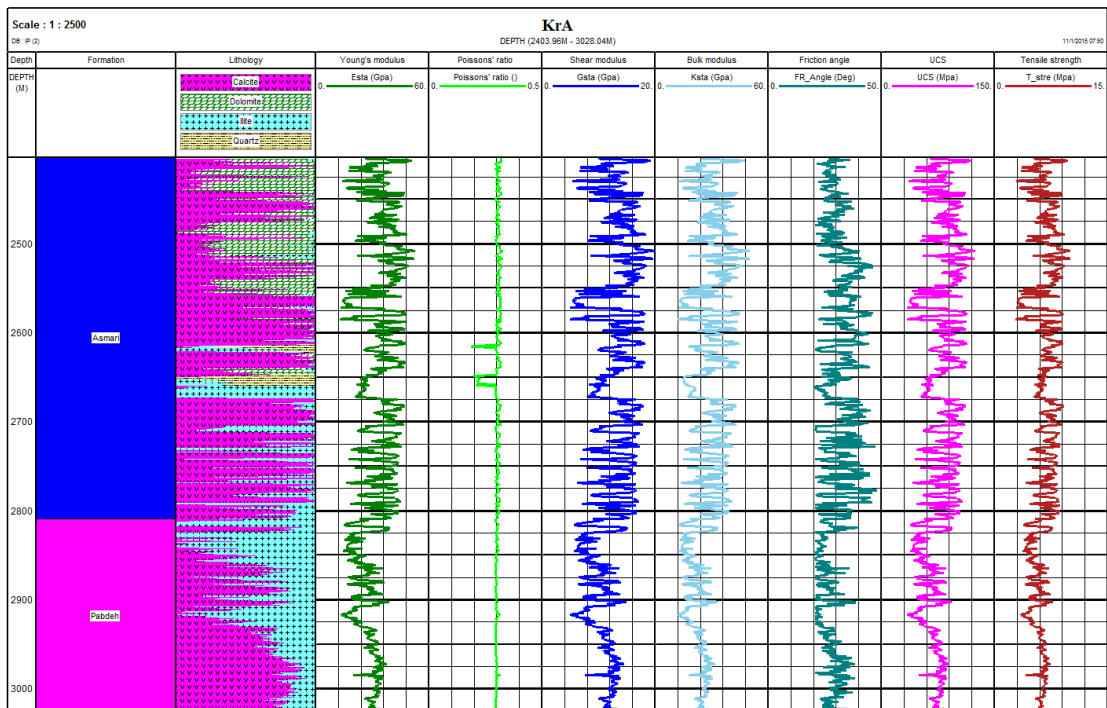
پیوست

۱-۹. پیوست شماره ۱

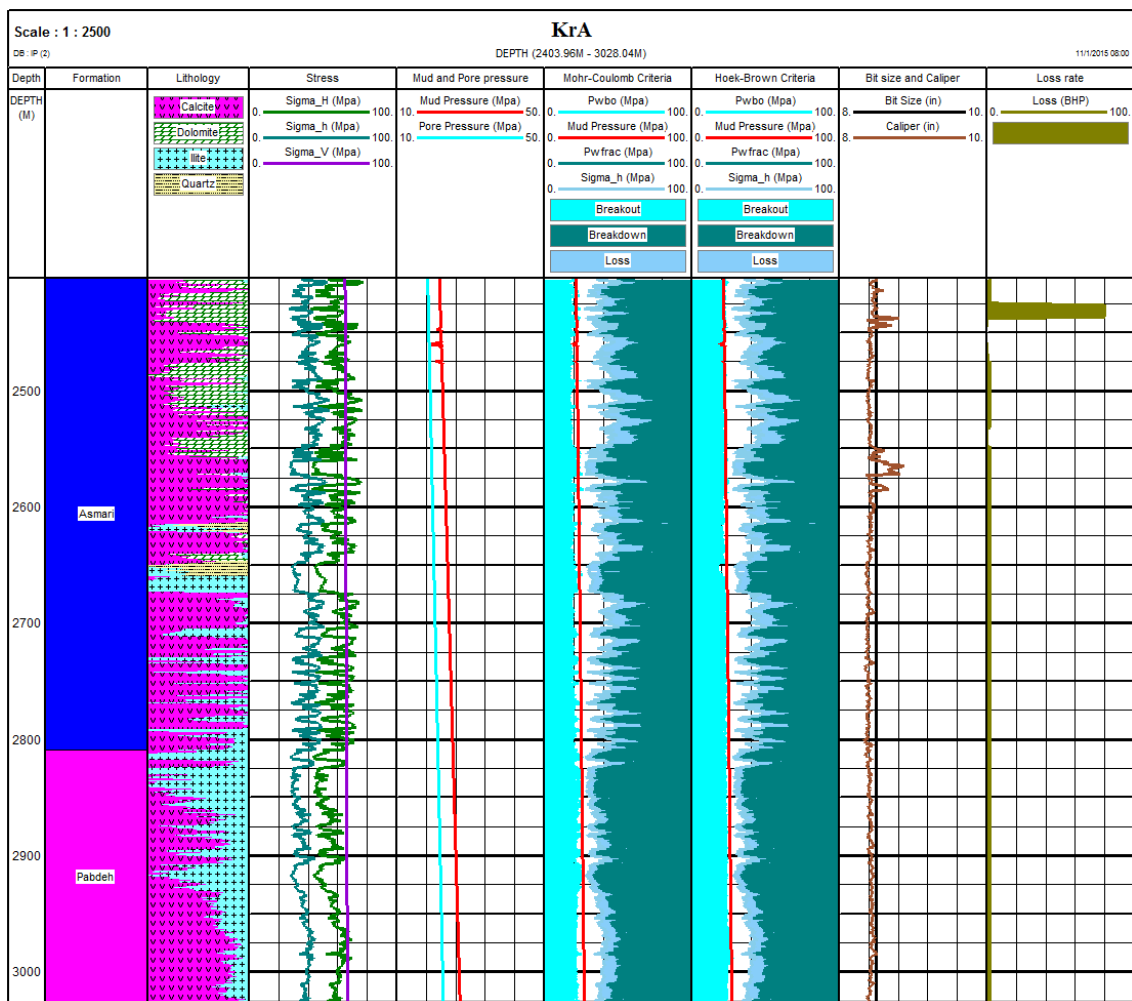
۱-۱-۹. چاه KrA



شکل ۱-۹. نگارهای پتروفیزیکی مورد استفاده برای مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه KrA



شکل ۲-۹. مقادیر ضرایب استاتیک و مقاومت سنگ تخمینی در محدوده عمقی مورد مطالعه در چاه KrA



شکل ۹-۳. پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده براساس دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون برای چاه KrA

جدول ۹-۱. ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه KrA

	Depth						
Depth	۱/۰۰	Cal					
Cal	-۰/۱۸	۱/۰۰	GR				
GR	۰/۳۹	-۰/۲۹	۱/۰۰	RHOB			
RHOB	۰/۲۸	-۰/۴۱	۰/۰۵	۱/۰۰	NPHI		
NPHI	۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۷۰	-۰/۴۱	۱/۰۰	DTCO	
DTCO	۰/۴۰	۰/۲۳	۰/۶۷	-۰/۴۳	۰/۸۶	۱/۰۰	DTSM
DTSM	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۶۴	-۰/۳۸	۰/۸۶	۰/۹۷	۱/۰۰

جدول ۹-۲. ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه KrA

	E												
E	۱/۰۰	ν											
ν	-۰/۳۵	۱/۰۰	G										
G	۱/۰۰	-۰/۳۲	۱/۰۰	K									
K	-۰/۹۹	-۰/۴۹	-۰/۹۸	۱/۰۰	λ								
λ	-۰/۹۷	-۰/۵۵	-۰/۹۶	۱/۰۰	۱/۰۰	V_{Sh}							
V_{Sh}	-۰/۶۳	-۰/۲۶	-۰/۶۳	-۰/۶۳	-۰/۶۲	۱/۰۰	ϕ						
ϕ	-۰/۷۳	-۰/۳۷	-۰/۷۳	-۰/۷۴	-۰/۷۴	-۰/۷۹	۱/۰۰	UCS					
UCS	۱/۰۰	-۰/۳۵	۱/۰۰	-۰/۹۹	-۰/۹۷	-۰/۶۳	-۰/۷۳	۱/۰۰	TS				
TS	-۰/۹۷	-۰/۲۱	-۰/۹۷	-۰/۹۴	-۰/۹۲	-۰/۵۰	-۰/۶۷	-۰/۹۷	۱/۰۰	CCS			
CCS	-۰/۹۳	-۰/۳۸	-۰/۹۳	-۰/۹۳	-۰/۹۲	-۰/۵۹	-۰/۷۴	-۰/۹۳	-۰/۹۱	۱/۰۰	PP		
PP	-۰/۴۱	-۰/۲۹	-۰/۴۱	-۰/۴۵	-۰/۴۶	-۰/۳۹	-۰/۳۳	-۰/۴۱	-۰/۳۲	-۰/۲۴	۱/۰۰		

جدول ۹-۳. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه KrA

	MV													
MV	۱/۰۰	MPV												
MPV	-۰/۲۴	۱/۰۰	MYP											
MYP	-۰/۰۴	-۰/۳۲	۱/۰۰	SC										
SC	-۰/۴۵	.	-۰/۳۳	۱/۰۰	MWR									
MWR	-۰/۳۷	-۰/۰۶	-۰/۱۱	-۰/۱۴	۱/۰۰	MO								
MO	-۰/۴۵	.	-۰/۳۳	-۱/۰۰	-۰/۱۴	۱/۰۰	ECD							
ECD	-۰/۶۱	-۰/۱۰	-۰/۰۴	-۰/۱۶	-۰/۳۰	-۰/۱۶	۱/۰۰	CT						
CT	-۰/۳۱	-۰/۴۷	-۰/۳۷	-۰/۲۵	-۰/۰۳	-۰/۲۵	-۰/۴۲	۱/۰۰	WOB					
WOB	-۰/۱۷	-۰/۱۸	-۰/۰۷	-۰/۱۷	-۰/۱۱	-۰/۱۷	-۰/۰۱	-۰/۰۲	۱/۰۰	RPM				
RPM	-۰/۱۷	-۰/۳۷	-۰/۶۰	-۰/۱۳	-۰/۰۶	-۰/۱۳	-۰/۴۳	-۰/۵۴	-۰/۰۷	۱/۰۰	Tor			
Tor	-۰/۲۹	-۰/۴۹	-۰/۳۹	-۰/۲۸	-۰/۱۴	-۰/۲۸	-۰/۳۷	-۰/۶۲	-۰/۰۴	-۰/۷۵	۱/۰۰	PuP		
PuP	-۰/۴۷	-۰/۴۲	-۰/۴۰	-۰/۳۱	-۰/۰۵	-۰/۳۱	-۰/۵۳	-۰/۷۴	-۰/۰۷	-۰/۷۳	-۰/۸۲	۱/۰۰	MD	
MD	-۰/۳۷	-۰/۱۸	-۰/۱۳	-۰/۱۵	-۰/۰۵	-۰/۱۵	-۰/۶۴	-۰/۱۶	-۰/۰۵	-۰/۳۴	-۰/۲۶	-۰/۳۴	۱/۰۰	FR
FR	-۰/۳۴	-۰/۳۳	-۰/۵۱	-۰/۰۶	-۰/۰۳	-۰/۰۶	-۰/۶۰	-۰/۶۶	-۰/۰۴	-۰/۹۱	-۰/۷۹	-۰/۸۹	-۰/۴۲	۱/۰۰

جدول ۹-۴. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و نگارهای پتروفیزیکی چاه KrA

نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
عمق	$ROP = -0.000026 \times Depth^2 + 0.14488 \times Depth - 195.1569$	۰/۴۸۵	۰/۸۸۷
گاما	$ROP = 0.00042 \times GR^2 - 0.0429 \times GR + 4.6312$	۰/۰۳۹	۱/۳۱۲
تخلخل	$ROP = 3.5653 \times e^{0.26698 \times NPHI}$	۰/۰۰۲	۱/۲۳۵
چگالی	$ROP = 89.3008 \times e^{-1.2174 \times RHOB}$	۰/۰۴۷	۱/۲۰۶
کندی موج فشاری	$ROP = 1.5974 \times e^{0.01284 \times DTCO}$	۰/۰۹۱	۱/۱۷۹
کندی موج برشی	$ROP = 1.6516 \times e^{0.00658 \times DTSM}$	۰/۰۷۸	۱/۱۸۶

جدول ۹-۵. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و ویژگی‌های ژئومکانیکی چاه KrA

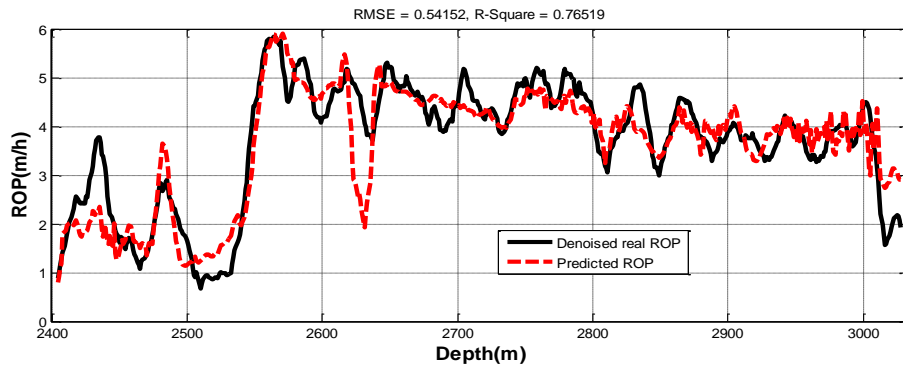
نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
ضریب پواسون	$ROP = 23.6535 \times e^{-6.19 \times \nu}$	۰/۰۵۸	۱/۲۰۰
حجم شیل	$ROP = 10.0454 \times V_{sh}^2 - 5.7031 \times V_{sh} + 4.3357$	۰/۰۳۹	۱/۲۱۲
زاویه اصطکاک داخلی	$ROP = 3.0353 \times e^{0.00635 \times \phi}$	۰/۰۰۷	۱/۲۳۱
مقاومت فشاری محصور شده	$ROP = 7.0536 \times e^{-0.00559 \times CCS}$	۰/۱۶۰	۱/۱۳۳
فشاری منفذی	$ROP = -0.5705 \times PP^2 + 23.7144 \times PP - 241.8434$	۰/۴۸۵	۰/۸۸۸

جدول ۹-۶. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و پارامترهای عملیاتی چاه KrA

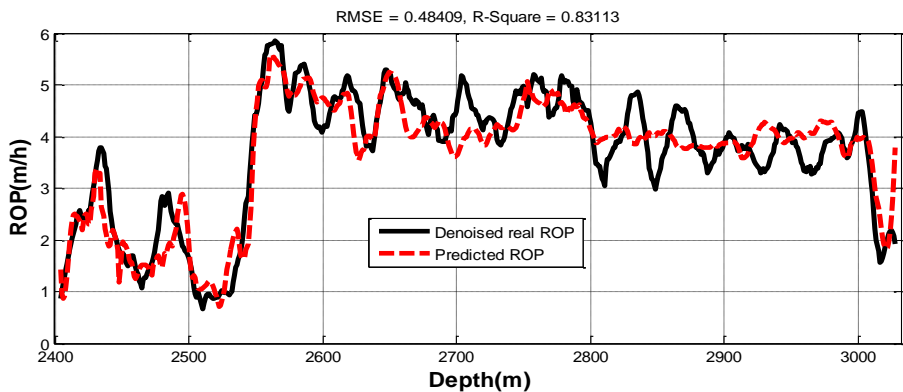
نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
ضریب گرانروی گل	$ROP = -0.27157 \times MV^2 + 19.6582 \times MV - 351.9784$	۰/۰۷۱	۱/۱۹۲
گرانروی پلاستیک گل	$ROP = 1.1572 \times e^{0.17192 \times MPV}$	۰/۰۵۰	۱/۲۰۴
حد تسلیم گل	$ROP = 25.5126 \times e^{-0.62644 \times MYP}$	۰/۲۲۸	۱/۰۸۶
محتوای جامد گل	$ROP = -0.67518 \times SC^2 + 10.1976 \times SC - 34.3836$	۰/۲۰۴	۱/۱۰۳
محتوای آب گل	$ROP = -29.4565 \times \ln(MWR) + 71.5086$	۰/۰۰۸	۱/۲۳۱
محتوای نفت گل	$ROP = -0.67518 \times MO^2 + 111.3353 \times MO - 4585.584$	۰/۲۰۴	۱/۱۰۳
چگالی معادل در جریان	$ROP = -1.381 \times ECD^2 + 159.5367 \times ECD - 4603.2186$	۰/۴۲۰	۰/۹۴۱
ضریب سائیدگی دندان‌ه مته	$ROP = 3.8037 \times CT^{0.092052}$	۰/۱۳۳	۱/۱۵۰
وزن روی مته	$ROP = 4.3171 \times WOB^{-0.088836}$	۰/۰۲۲	۱/۲۲۲
سرعت دوران	$ROP = 1.353 \times e^{0.007048 \times RPM}$	۰/۶۸۱	۰/۶۹۸
گشتاور	$ROP = 0.5163 \times e^{0.021483 \times Tor}$	۰/۴۰۷	۰/۹۵۱
فشار پمپ	$ROP = 0.001077 \times PuP^{0.98349}$	۰/۲۹۹	۱/۰۳۵
چگالی گل	$ROP = -4.2335 \times MD^2 + 474.5521 \times MD - 13294.8544$	۰/۱۱۱	۱/۱۶۵
نرخ جریان	$ROP = 0.56985 \times e^{0.0055298 \times FR}$	۰/۵۲۹	۰/۸۴۸

جدول ۹-۷. مدل‌های حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح اول چاه KrA

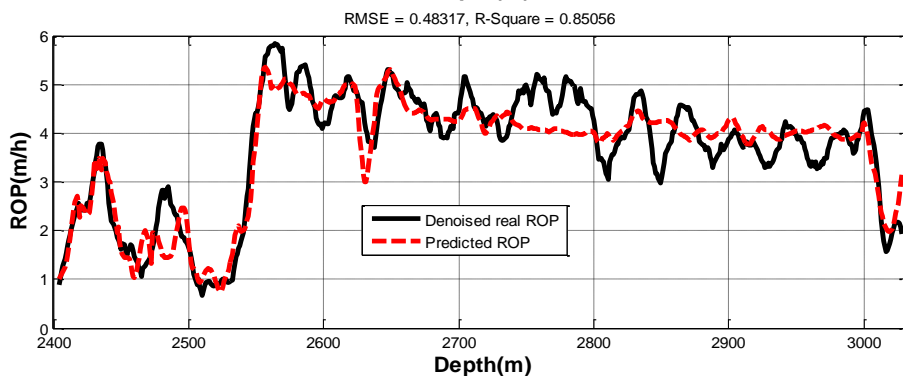
نام مدل	رابطه	R-Square	RMSE
مدل شماره ۱	$ROP = e^{(-6.733-0.5887CT+0.0897WOB+0.0052RPM+0.0956Tor+0.0011PuP)} \times e^{(CT \times (-0.0025RPM+0.0141Tor-0.00011PuP))} \times e^{(RPM \times (0.00033WOB-0.00023Tor))} \times e^{(PuP \times (-3.7 \times 10^{-5}WOB+5.21 \times 10^{-6}RPM-1.57 \times 10^{-5}Tor))}$	۰/۷۶۵	۰/۵۴۲
مدل شماره ۲	$ROP = e^{(-268.67+4.2777DTCO+4.7024ECD+7.3379WOB+0.1833RPM-0.1488FR)} \times e^{(DTCO \times (-0.0738ECD+0.0014WOB-0.00036RPM))} \times e^{(ECD \times (-0.1451WOB-0.0022RPM+0.0024FR))} \times e^{(WOB \times (-0.00104RPM+0.0029FR))} \times e^{(-6.196 \times 10^{-5}RPM \times FR)}$	۰/۸۳۱	۰/۴۸۴
مدل شماره ۳	$ROP = e^{(69.93-0.5254CCS-1.2548ECD+0.1999RPM+0.0498PuP-0.5844FR)} \times e^{(CCS \times (0.0092ECD+0.00014RPM+3.623 \times 10^{-6}PuP-0.00012FR))} \times e^{ECD \times (-0.0037RPM-0.00089PuP+0.0108FR)} \times e^{RPM \times (4.6 \times 10^{-6}PuP-6.155 \times 10^{-5}FR)}$	۰/۸۵۱	۰/۴۸۳



(الف)



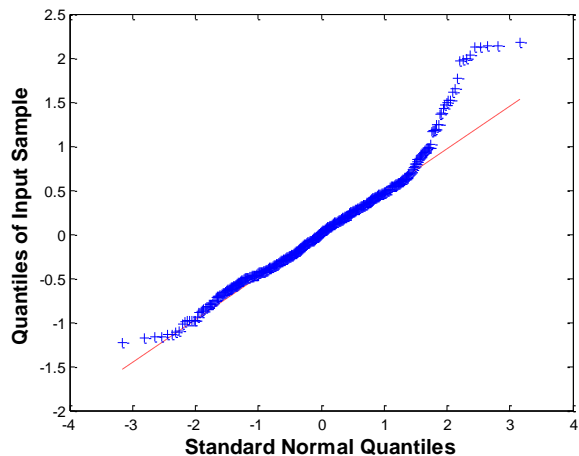
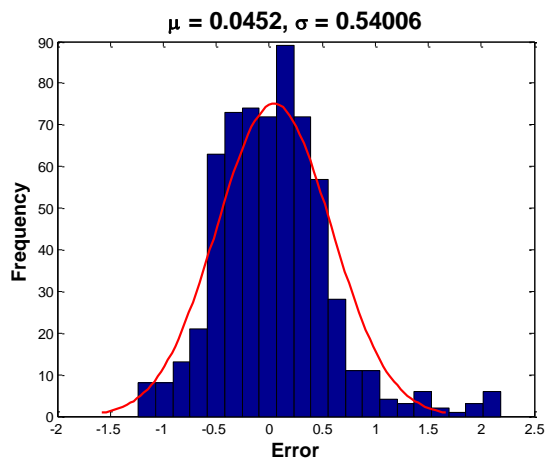
(ب)



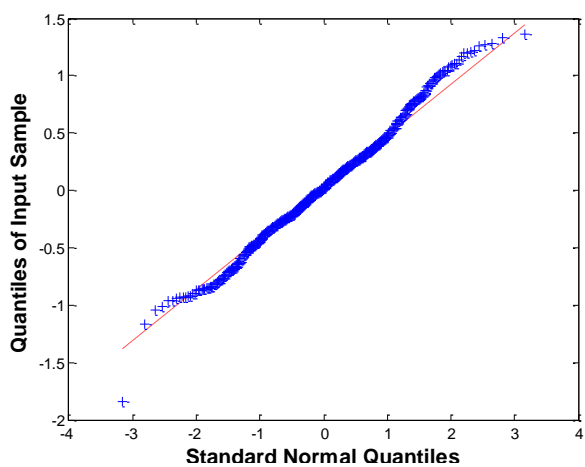
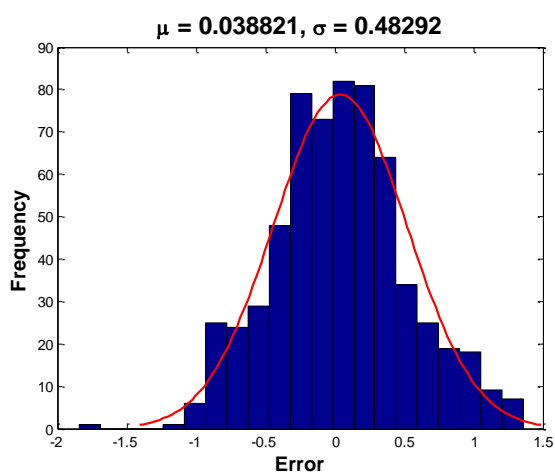
(ج)

شکل ۹-۴. مقایسه نرخ نفوذ تخمینی در چاه KrA با استفاده از داده‌های انتخاب شده پایگاه داده سطح

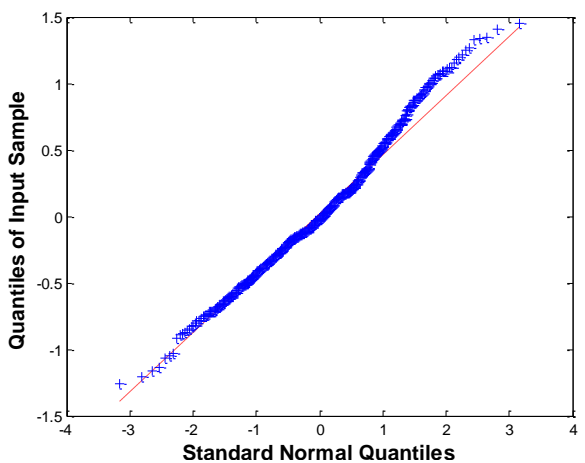
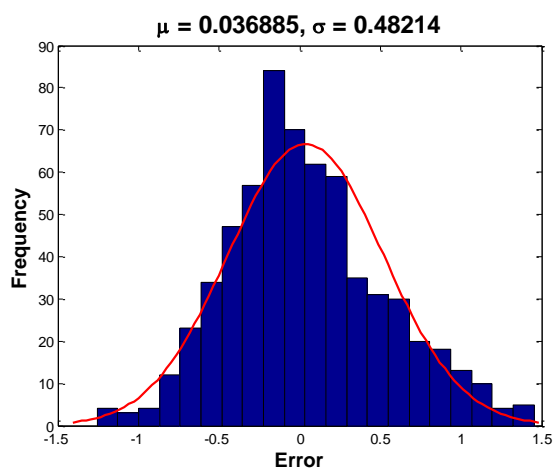
اول: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳



(الف)

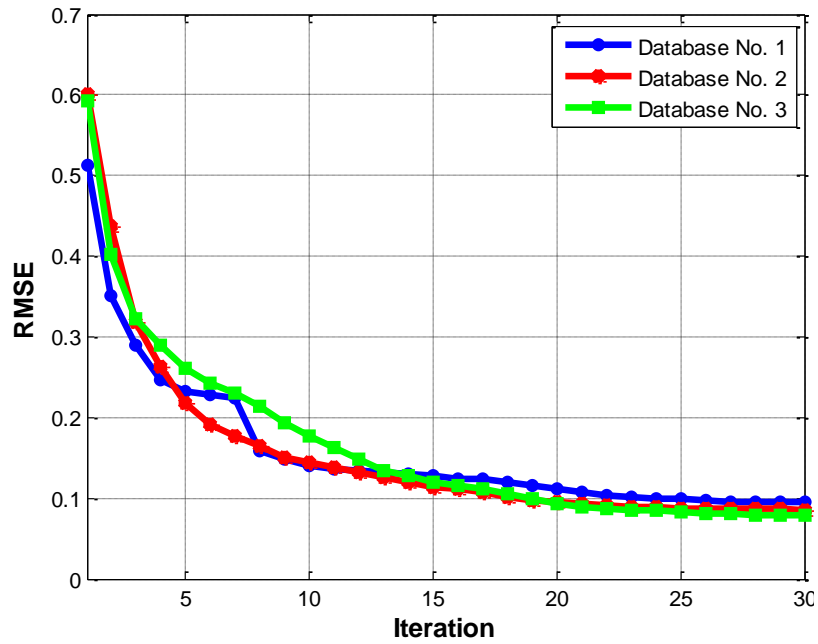


(ب)



(ج)

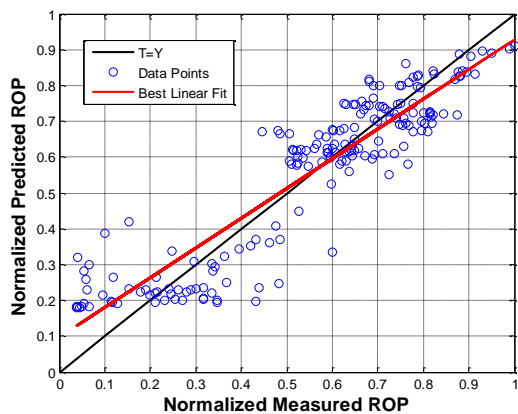
شکل ۹-۵. تحلیل باقیمانده با استفاده از نمودار Q-Q (سمت راست) و توزیع فراوانی (سمت چپ) برای: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ در چاه Kra



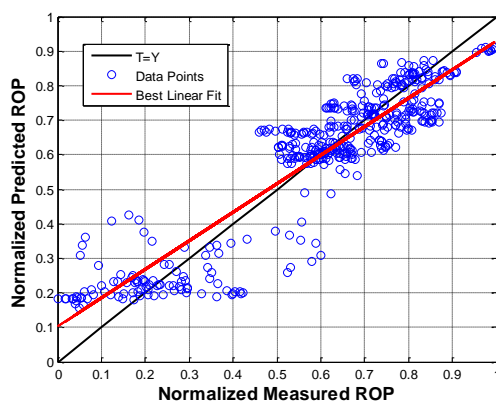
شکل ۹-۶. تغییرات خطا در تکرارهای مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های داده سطح اول چاه KrA

جدول ۹-۸. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA برای پایگاه‌های داده‌های سطح اول چاه KrA

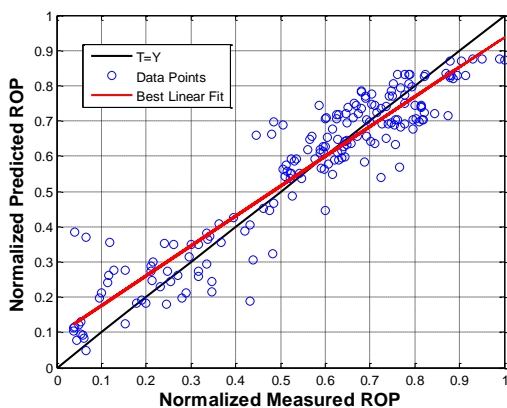
شماره پایگاه داده	مرحله	R-Square	RMSE
۱	آموزش	۰/۹۱۳	۰/۰۹۵
	آزمون	۰/۹۱۶	۰/۰۹۹
۲	آموزش	۰/۹۳۹	۰/۰۸۵
	آزمون	۰/۹۳۲	۰/۰۸۶
۳	آموزش	۰/۹۴۷	۰/۰۷۸
	آزمون	۰/۹۳۲	۰/۰۸۶



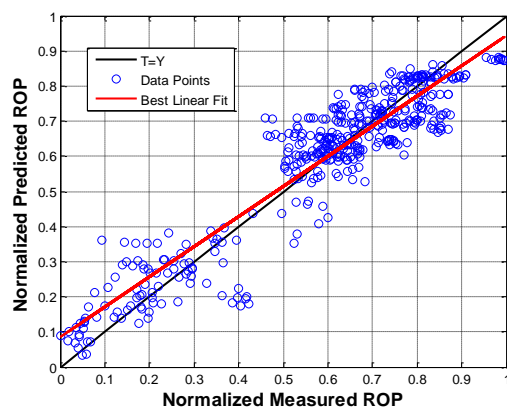
(ب) پایگاه داده ۱



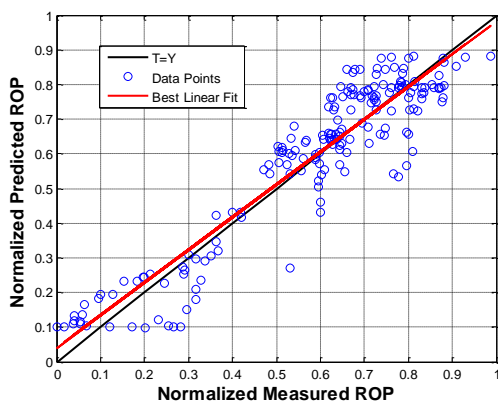
(الف) پایگاه داده ۱



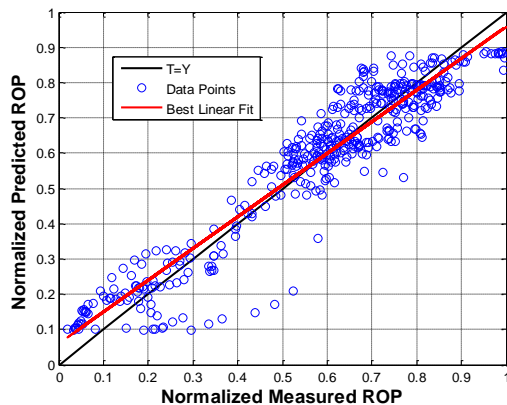
(د) پایگاه داده ۲



(ج) پایگاه داده ۲

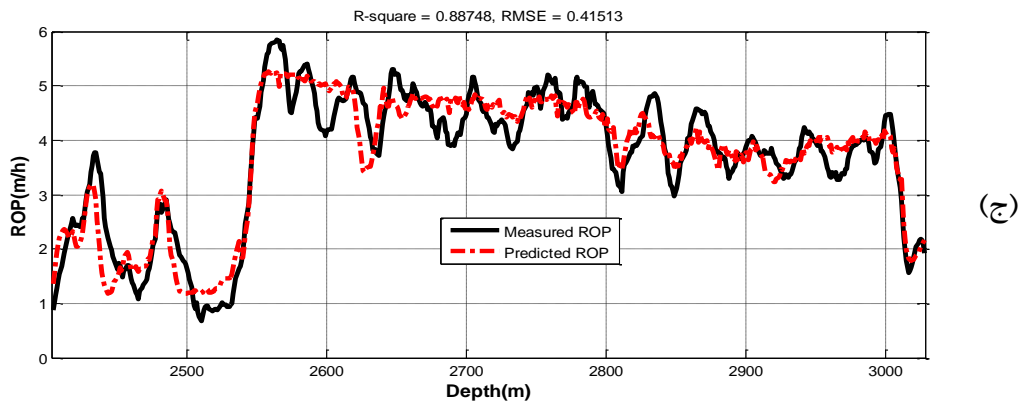
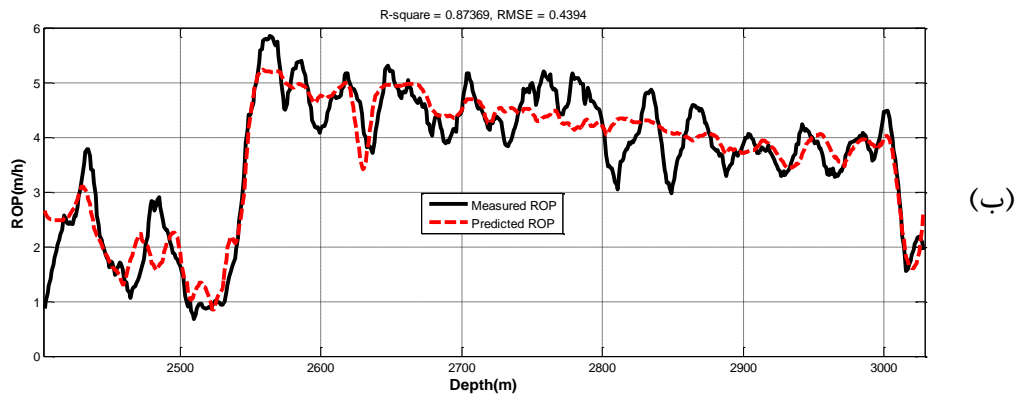
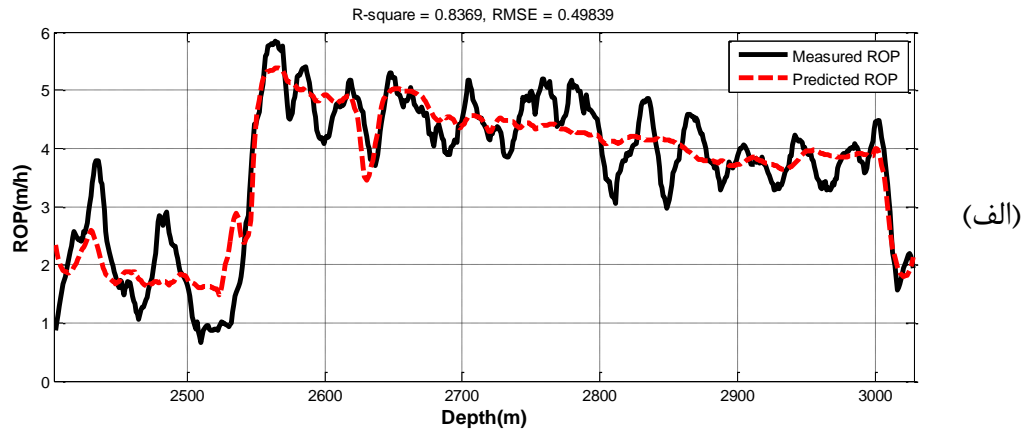


(ه) پایگاه داده ۳

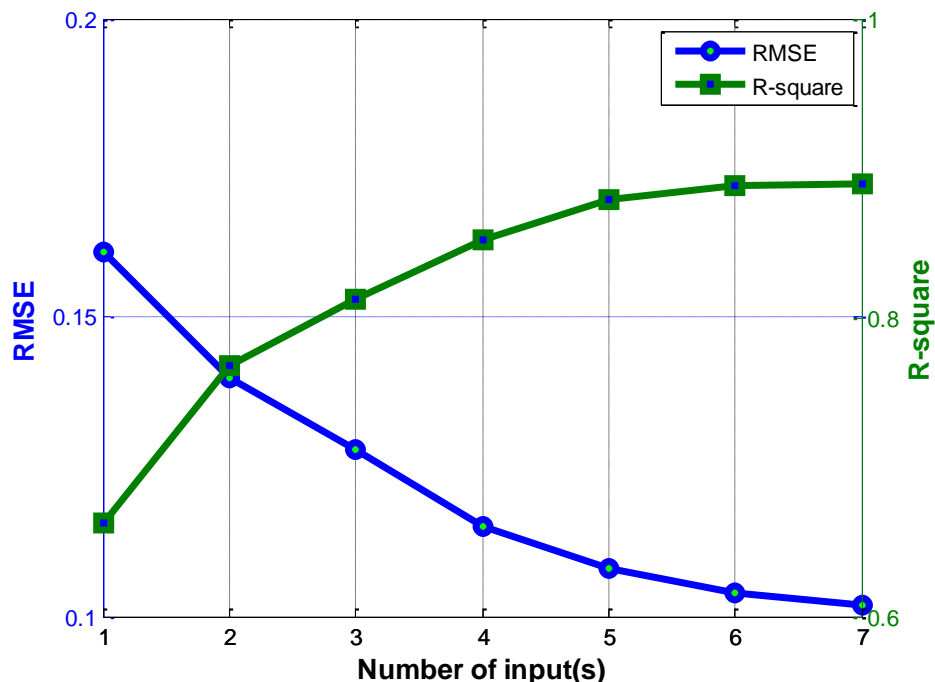


(و) پایگاه داده ۳

شکل ۹-۷. نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های مختلف سطح اول چاه KrA برای مرحله آموزش (الف، ج، و) و آزمون (ب، د، ه)



شکل ۹-۸. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های سطح اول چاه KrA: پایگاه (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳



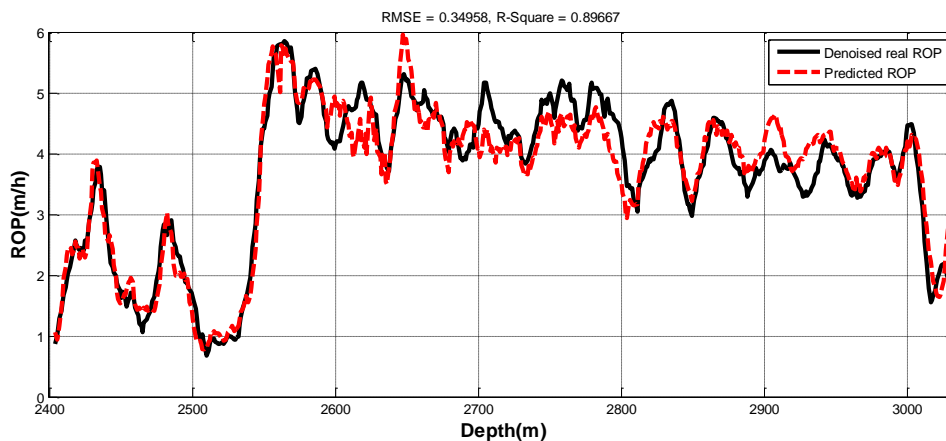
شکل ۹-۹. نمودار تغییرات خطا و ضریب همبستگی به ازای تعداد ورودی انتخاب شده برای مدل تخمین گر نرخ نفوذ با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه KrA

جدول ۹-۹. نتیجه اعمال الگوریتم انتخاب ویژگی روی داده‌های سطح دوم چاه KrA (ویژگی‌های انتخاب شده با خط پررنگ نمایش داده شده است)

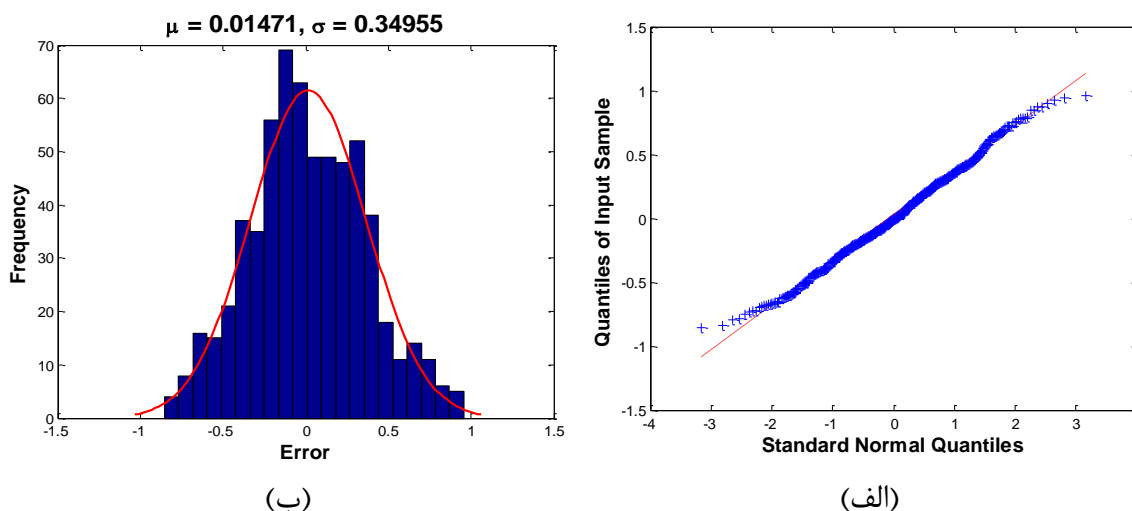
R-Square	RMSE	نوع ورودی‌ها	تعداد ورودی‌ها
۰/۶۶۲	۰/۱۶۱	RDI	۱
۰/۷۶۸	۰/۱۴۰	RDI, Tor	۲
۰/۸۱۲	۰/۱۲۸	RDI, Tor, RPM	۳
۰/۸۵۲	۰/۱۱۵	RDI, Tor, RPM, WOB	۴
۰/۸۷۹	۰/۱۰۸	RDI, Tor, RPM, WOB, FR	۵
۰/۸۸۸	۰/۱۰۴	RDI, Tor, RPM, WOB, FR, CT	۶
۰/۸۹۰	۰/۱۰۲	RDI, Tor, RPM, WOB, FR, CT, Depth	۷

جدول ۹-۱۰. مدل حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح دو چاه KrA

RMSE	R-Square	رابطه	نام مدل
۰/۳۵۰	۰/۸۹۷	$\ln(ROP) = -4.050 + 0.8308RDI - 0.08WOB + 0.0241RPM + 0.129Tor - 0.0244FR + RDI \times (0.0241WOB - 0.0069RPM - 0.0285Tor + 0.0089FR) + WOB \times (-0.00046RPM - 0.0051Tor + 0.0016FR) + RPM \times (0.00021Tor - 4.765 \times 10^{-5}FR) - 8.834 \times 10^{-5}FR \times Tor$	مدل شماره ۴



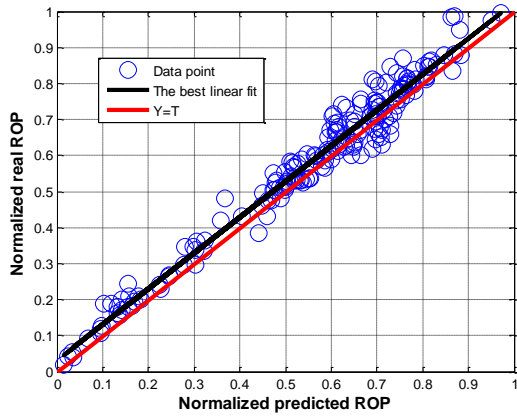
شکل ۹-۱۰. مقایسه نرخ نفوذ نوفه زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل شماره ۴ چاه KrA



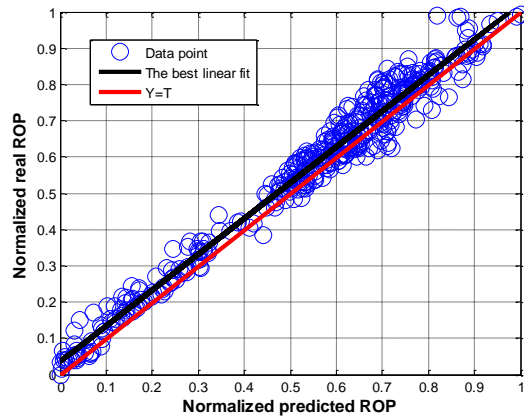
شکل ۹-۱۱. نمودار (الف) Q-Q و (ب) توزیع فراوانی خطا برای مدل رگرسیونی شماره ۴ چاه KrA

جدول ۹-۱۱. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA براساس داده‌های سطح دوم چاه KrA

مرحله	R-square	RMSE
آموزش	۰/۹۲۷	۰/۰۴۹
آزمون	۰/۹۲۶	۰/۰۵۰

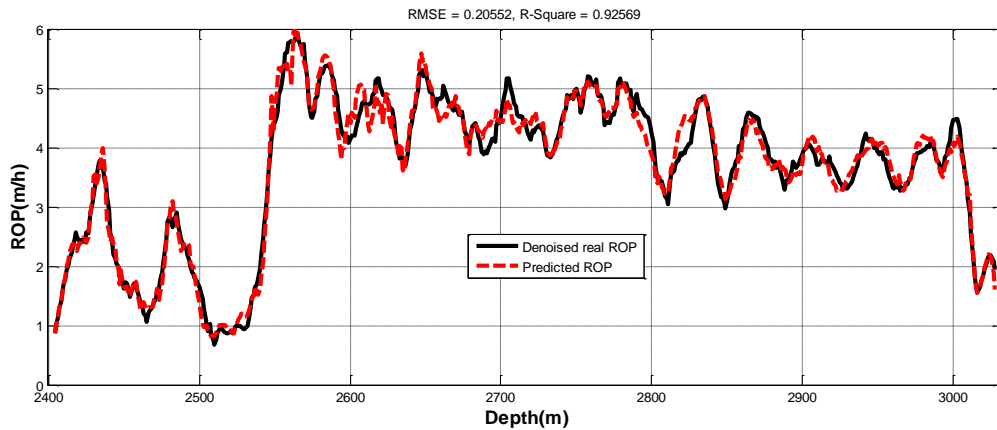


(ب)



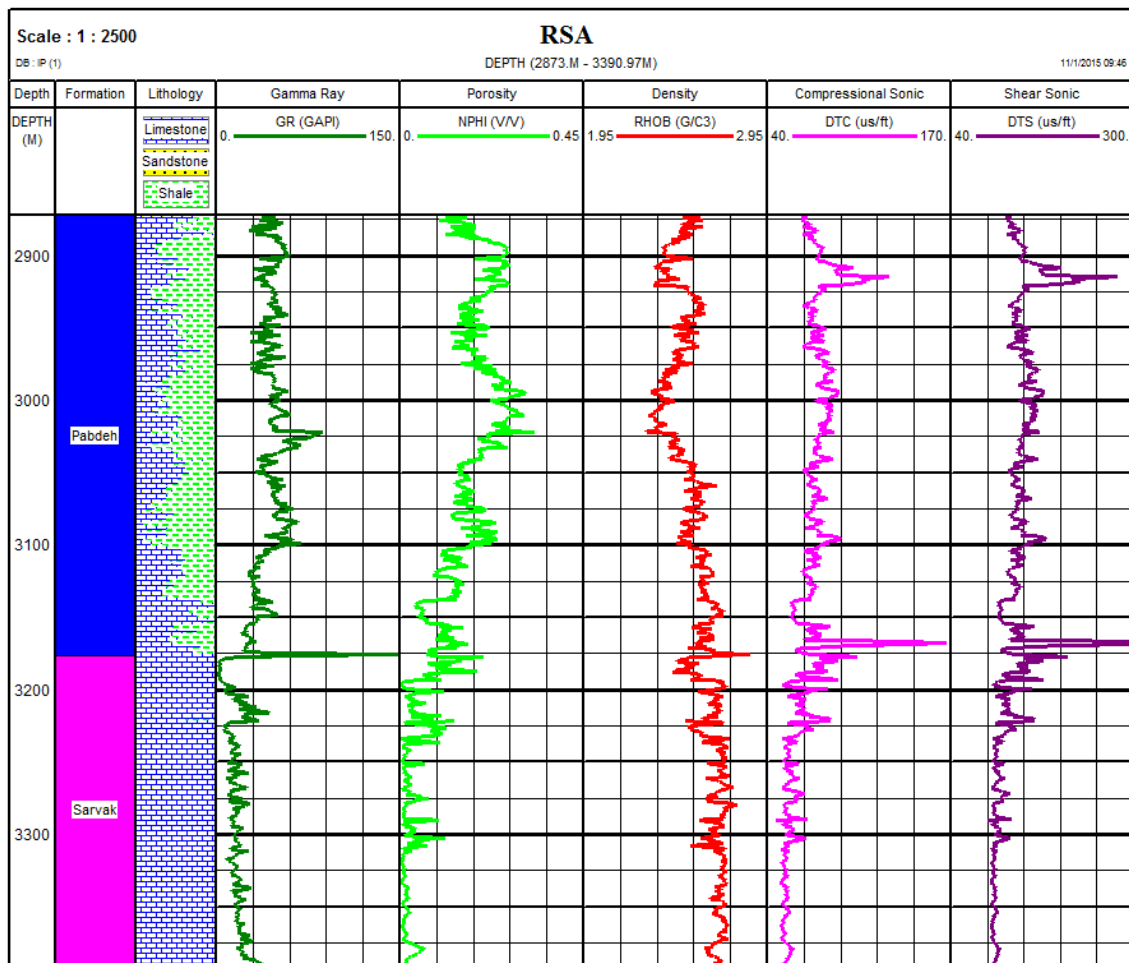
(الف)

شکل ۹-۱۲. نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نرمالیزه شده و تخمینی نرمالیزه شده با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه KrA در مرحله آموزش و (ب) آزمون

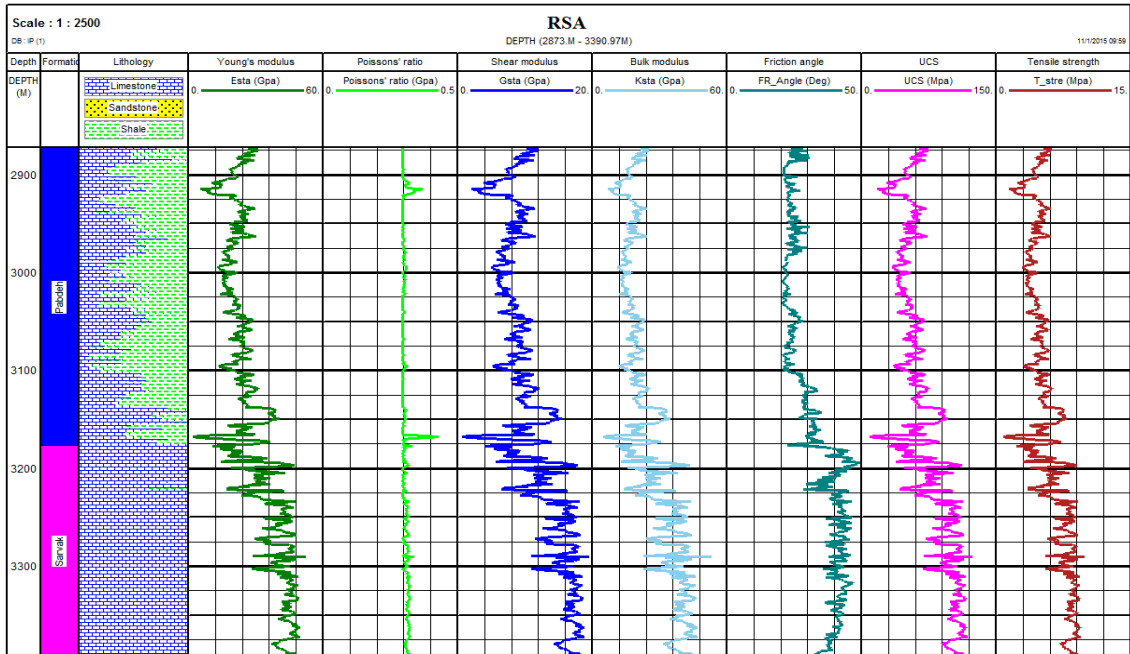


شکل ۹-۱۳. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل MLP-COA در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه KrA با داده‌های سطح دوم

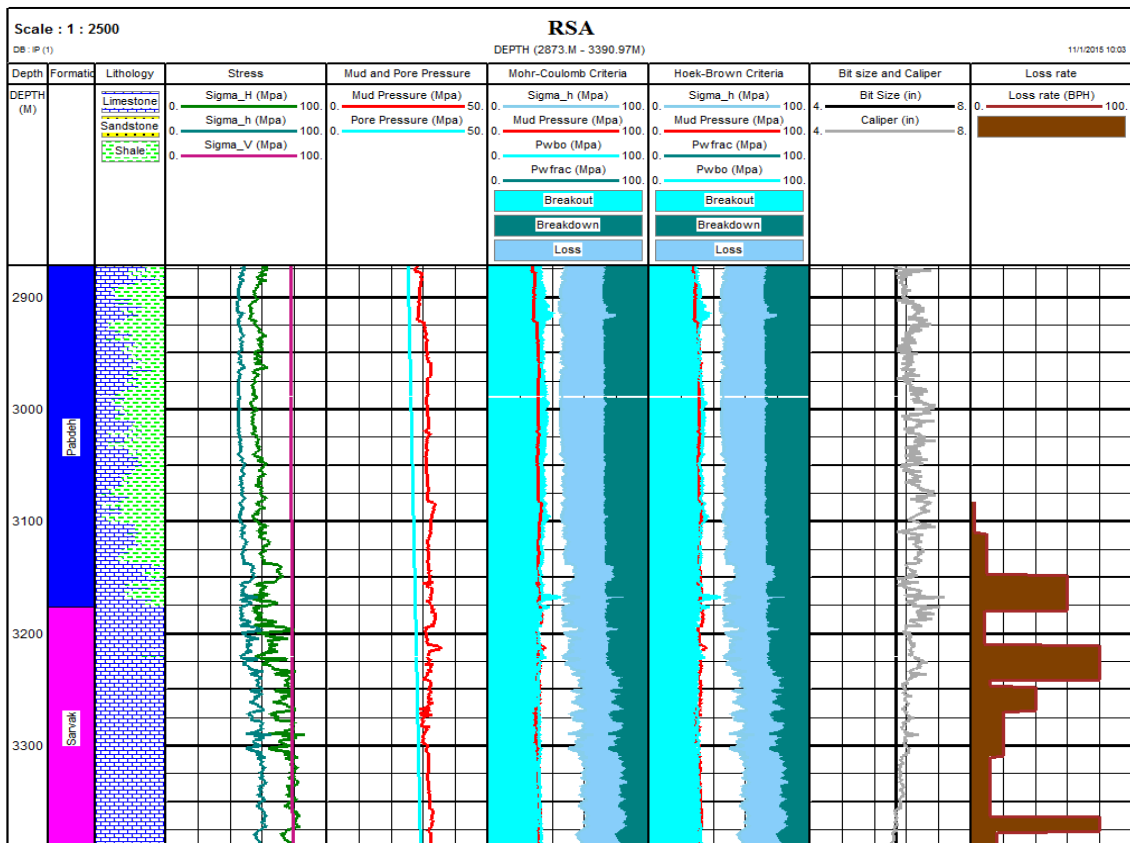
RSA ۹-۱-۲. چاه



شکل ۹-۱۴. نگارهای پتروفیزیکی مورد استفاده برای مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه RSA



شکل ۹-۱۵. مقادیر ضرایب استاتیک و مقاومت سنگ تخمینی در محدوده عمقی مورد مطالعه در چاه RSA



شکل ۹-۱۶. پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده براساس دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون برای چاه RSA

جدول ۹-۱۲. ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه RSA

	Depth											
Depth	۱/۰۰	Cal										
Cal	-۰/۴۳	۱/۰۰	RT									
RT	۰/۱۲	۰	۱/۰۰	GR								
GR	-۰/۷۳	۰/۳۶	-۰/۳۵	۱/۰۰	RHOB							
RHOB	۰/۸۰	-۰/۴۶	-۰/۰۳	-۰/۶۵	۱/۰۰	NPHI						
NPHI	-۰/۸۷	۰/۵۳	-۰/۱۷	۰/۷۹	-۰/۹۵	۱/۰۰	DTCO					
DTCO	-۰/۷۱	۰/۵۹	-۰/۰۸	۰/۵۴	-۰/۷۹	۰/۸۱	۱/۰۰	DTSM				
DTSM	-۰/۶۰	۰/۵۲	-۰/۰۸	۰/۴۵	-۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۹۵	۱/۰۰				

جدول ۹-۱۳. ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه RSA

	E																
E	۱/۰۰	ν															
ν	-۰/۳۵	۱/۰۰	G														
G	۱/۰۰	۰/۳۴	۱/۰۰	K													
K	۱/۰۰	۰/۴۳	۰/۹۹	۱/۰۰	λ												
λ	۰/۹۹	۰/۴۶	۰/۹۹	۱/۰۰	۱/۰۰	V_{sh}											
V_{sh}	-۰/۶۳	-۰/۳۷	-۰/۶۳	-۰/۶۳	-۰/۶۳	۱/۰۰	ϕ										
ϕ	-۰/۸۱	۰/۴۲	-۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۸۱	-۰/۹۳	۱/۰۰	UCS									
UCS	۱/۰۰	۰/۳۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۹	-۰/۶۳	۰/۸۱	۱/۰۰	TS								
TS	۱/۰۰	۰/۳۳	۱/۰۰	۰/۹۹	۰/۹۹	-۰/۶۰	۰/۷۸	۱/۰۰	۱/۰۰	CCS							
CCS	۰/۹۵	۰/۳۷	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۹۴	-۰/۷۷	۰/۹۲	۰/۹۵	۰/۹۴	۱/۰۰	PP						
PP	-۰/۸۲	۰/۴۵	-۰/۸۱	-۰/۸۲	۰/۸۲	-۰/۷۳	۰/۸۶	-۰/۸۲	-۰/۸۰	۰/۸۷	۱/۰۰						

جدول ۹-۱۴. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه RSA

	MV																	
MV	۱/۰۰	MPV																
MPV	۰/۴۸	۱/۰۰	MYP															
MYP	۰/۳۹	-۰/۵۹	۱/۰۰	SC														
SC	-۰/۳۹	-۰/۰۲	-۰/۴۶	۱/۰۰	MWR													
MWR	-۰/۲۸	-۰/۳۴	-۰/۸۲	۰/۶۷	۱/۰۰	MO												
MO	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۸۲	-۰/۶۹	-۱/۰۰	۱/۰۰	ECD											
ECD	۰/۱۹	-۰/۲۸	-۰/۴۹	۰/۱۰	۰/۴۵	-۰/۴۵	۱/۰۰	CT										
CT	-۰/۳۰	-۰/۱۳	۰/۵۱	-۰/۱۴	-۰/۳۷	-۰/۳۷	-۰/۵۳	۱/۰۰	WOB									
WOB	-۰/۱۴	-۰/۰۹	-۰/۲۶	۰/۲۹	-۰/۳۳	-۰/۳۳	۰/۱۱	-۰/۰۴	۱/۰۰	RPM								
RPM	۰/۰۷	۰	-۰/۰۲	-۰/۰۵	۰/۰۶	-۰/۰۶	۰/۲۹	-۰/۰۹	۰	۱/۰۰	Tor							
Tor	-۰/۱۴	-۰/۰۲	۰/۳۷	-۰/۰۹	-۰/۳۱	-۰/۳۰	-۰/۳۸	-۰/۳۹	-۰/۲۲	-۰/۰۵	۱/۰۰	PuP						
PuP	۰/۲۱	-۰/۲۲	-۰/۶۲	۰/۲۶	-۰/۵۸	-۰/۵۷	۰/۵۱	-۰/۶۶	۰/۴۱	۰/۱۸	-۰/۵۰	۱/۰۰	MD					
MD	۰/۴۱	-۰/۱۱	-۰/۴۶	۰/۱۱	-۰/۴۸	-۰/۴۸	۰/۶۴	-۰/۶۳	۰/۱۷	۰/۱۷	-۰/۳۹	۰/۷۱	۱/۰۰	FR				
FR	-۰/۱۰	-۰/۲۰	۰/۰۳	-۰/۰۶	-۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۴۴	-۰/۰۲	-۰/۰۹	۰/۳۰	-۰/۱۵	۰/۲۱	-۰/۱۳	۱/۰۰				

جدول ۹-۱۵. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و نگارهای پتروفیزیکی چاه RSA

نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
عمق	$ROP = 215.6676 \times e^{-0.00138 \times Depth}$	۰/۲۳۱	۱/۱۲۹
مقاومت ویژه	$ROP = 3.5049 \times RT^{-0.04647}$	۰/۰۱۵۸	۱/۲۷۶
گاما	$ROP = -0.00046 \times GR^2 + 0.05526 \times GR + 1.7419$	۰/۱۰۸	۱/۲۱۶
تخلخل	$ROP = 2.0812 \times e^{2.6757 \times NPHI}$	۰/۳۰۰	۱/۰۷۷
چگالی	$ROP = 449.7336 \times e^{-1.9641 \times RHOB}$	۰/۲۹۶	۱/۰۸
کندی موج فشاری	$ROP = 1.1636 \times e^{0.01329 \times DTCO}$	۰/۲۶۸	۱/۱۰۱
کندی موج برشی	$ROP = 0.02867 \times DTSM^{0.95269}$	۰/۲۶۸	۱/۱۰۱

جدول ۹-۱۶. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و ویژگی‌های ژئومکانیکی چاه RSA

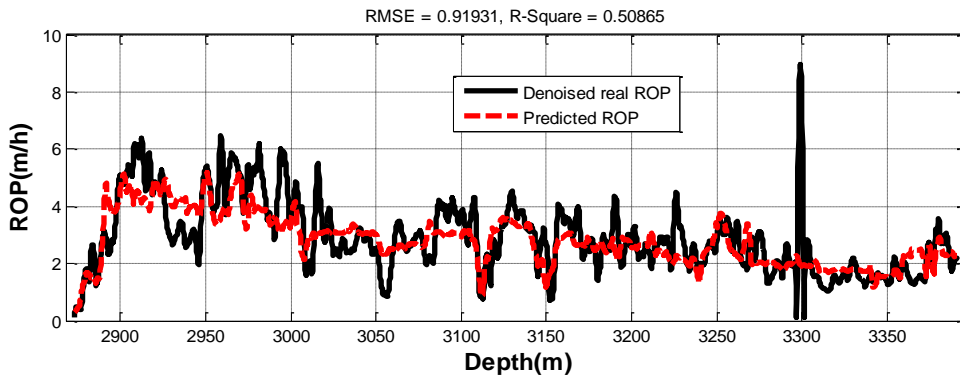
نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
ضریب پواسون	$ROP = 607.4304 \times \nu^2 - 402.2052 \times \nu + 68.9538$	۰/۰۵۱	۱/۲۵۴
حجم شیل	$ROP = -9.7612 \times V_{sh}^2 + 7.7894 \times V_{sh} + 1.8487$	۰/۱۰۸	۱/۲۱۶
زاویه اصطکاک داخلی	$ROP = 6.1247 \times e^{-0.0239 \times \phi}$	۰/۲۰۱	۱/۱۵۰
مقاومت فشاری محصور شده	$ROP = 5.8787 \times e^{-0.00567 \times CCS}$	۰/۴۱۷	۰/۹۸۲
فشاری منفذی	$ROP = 435.3386 \times e^{-0.1847 \times PP}$	۰/۲۳۱	۱/۱۲۹

جدول ۹-۱۷. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و پارامترهای عملیاتی چاه RSA

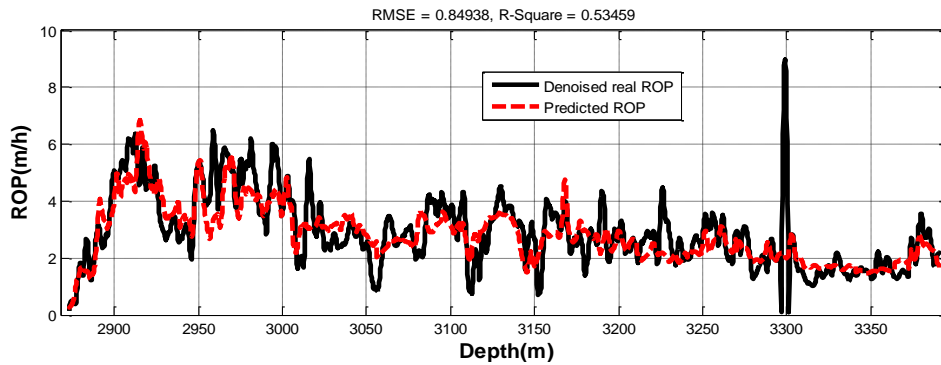
نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
ضریب گرانیروی گل	$ROP = -0.07549 \times MV^2 + 6.9061 \times MV - 154.7618$	۰/۰۳۴	۱/۲۶۵
گرانیروی پلاستیک گل	$ROP = -0.1191 \times MPV^2 + 4.5136 \times MPV - 39.6379$	۰/۰۸۸	۱/۲۲۹
حد تسلیم گل	$ROP = 9.4556 \times e^{-0.1222 \times MYP}$	۰/۲۲۶	۱/۱۳۲
محتوای جامد گل	$ROP = -0.33682 \times SC^2 + 8.8493 \times SC - 54.8768$	۰/۰۴۱	۱/۲۶۰
محتوای آب گل	$ROP = 0.6427 \times \ln(MWR) + 0.83192$	۰/۱۹۶	۱/۱۵۴
محتوای نفت گل	$ROP = -0.01048 \times MO^2 + 0.7709 \times MO + 2.9121$	۰/۱۹۴	۱/۱۵۵
چگالی معادل در جریان	$ROP = 0.26423 \times e^{0.036569 \times ECD}$	۰/۱۰۶	۱/۲۱۷
ضریب سائیدگی دندانته مته	$ROP = 3.6896 \times e^{-0.17736 \times CT}$	۰/۱۴۱	۱/۱۹۲
وزن روی مته	$ROP = 3.0504 \times e^{-0.005394 \times WOB}$	۰/۰۰۲	۱/۲۸۵
سرعت دوران	$ROP = 0.03428 \times RPM^{0.81471}$	۰/۱۱۱	۱/۲۱۳
گشتاور	$ROP = 3.714 \times e^{-0.002103 \times Tor}$	۰/۰۴۰	۱/۲۶۰
فشار پمپ	$ROP = 1.4962 \times e^{0.000407 \times PuP}$	۰/۱۷۳	۱/۱۷۰
چگالی گل	$ROP = 0.027914 \times e^{0.072739 \times MD}$	۰/۱۹۶	۱/۱۵۳
نرخ جریان	$ROP = 2.9894 \times e^{-0.0000719 \times FR}$	۰/۰۰۸	۱/۲۸۱

جدول ۹-۱۸. مدل‌های حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح اول چاه RSA

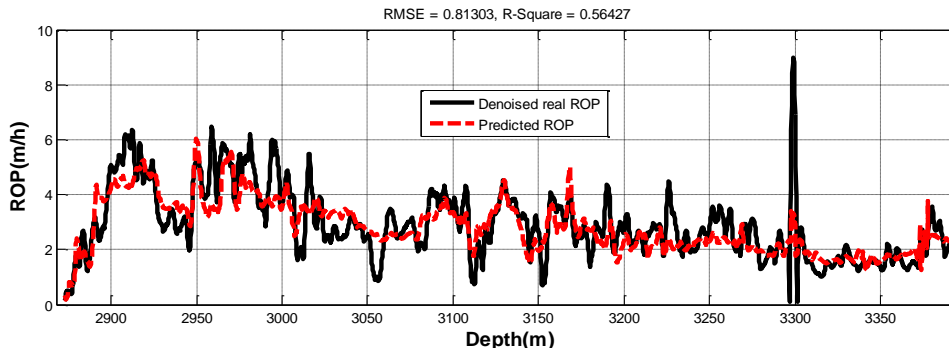
RMSE	R-Square	رابطه	نام مدل
۰/۹۱۹	۰/۵۰۹	$ROP = e^{(-1.3478+0.2247MYP-0.1744WOB+0.02963RPM-0.01615Tor-0.00047PuP)} \times$ $e^{(MYP \times (0.0036WOB - 0.0024RPM + 0.0011Tor + 4.16 \times 10^{-5}PuP))} \times$ $e^{WOB \times (0.00041RPM + 0.00012Tor)} \times e^{RPM \times (-3.27 \times 10^{-5}Tor - 2.61 \times 10^{-6}PuP)} \times$ $e^{7.6 \times 10^{-6}Tor \times PuP}$	مدل شماره ۱
۰/۸۴۹	۰/۵۳۵	$ROP = e^{(12.597-0.0054Depth-0.2943DTCO+0.8133MYP-0.9185WOB+0.0330RPM)} \times$ $e^{(Depth \times (0.00012DTCO - 0.00012MYP + 0.00027WOB - 8.332 \times 10^{-6}RPM))} \times$ $e^{(MYP \times (-0.0072DTCO - 0.00052RPM))} \times e^{(WOB \times (0.0011DTCO - 0.0059MYP + 0.0002RPM))}$	مدل شماره ۲
۰/۸۱۳	۰/۵۶۴	$ROP = e^{(6.0014-0.0090CCS+0.1228MYP-0.1175ECD+0.0199WOB-0.0035RPM)} \times$ $e^{(CCS \times (-0.00016MYP + 0.00036ECD + 0.00019WOB - 7.71 \times 10^{-5}RPM))} \times$ $e^{(ECD \times (-0.0025WOB + 0.00031RPM))} \times e^{(RPM \times (-0.00068MYP + 0.0004RPM))}$	مدل شماره ۳



(الف)



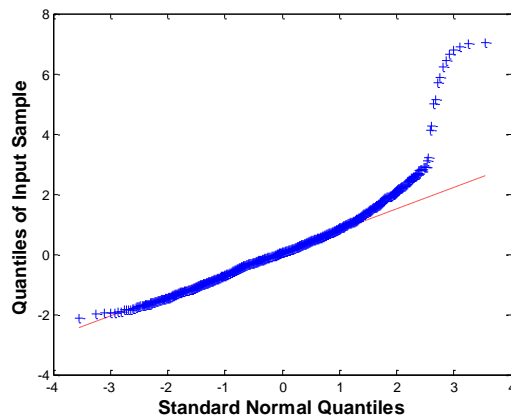
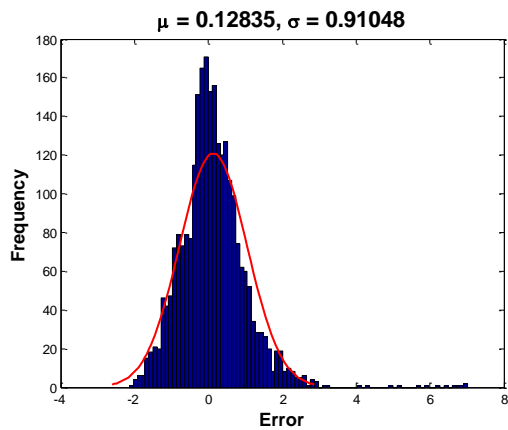
(ب)



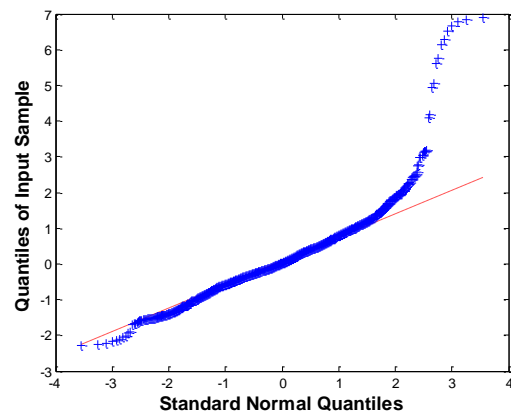
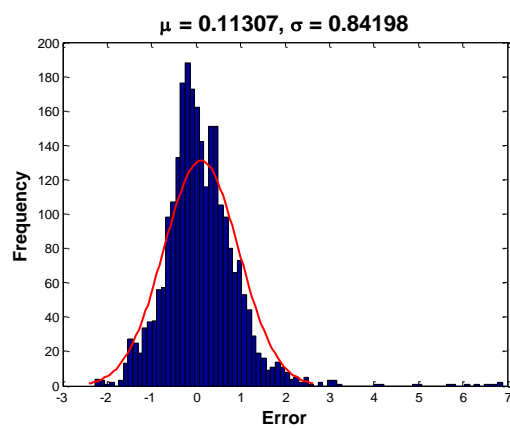
(ج)

شکل ۹-۱۷. مقایسه نرخ نفوذ تخمینی در چاه RSA با استفاده از داده‌های انتخاب شده پایگاه داده سطح

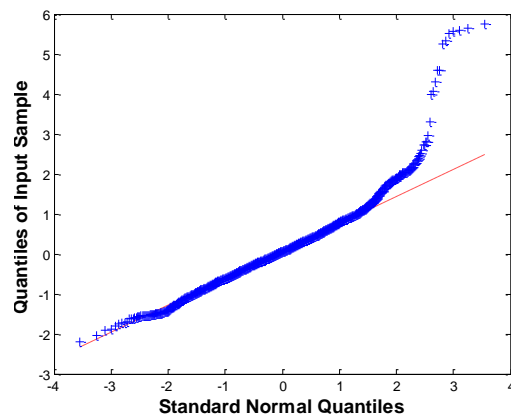
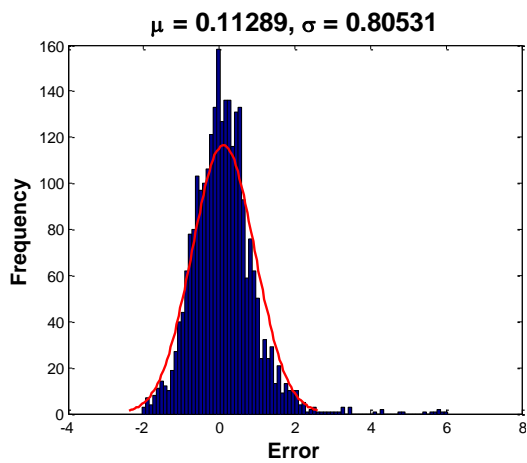
اول: (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳



(الف)

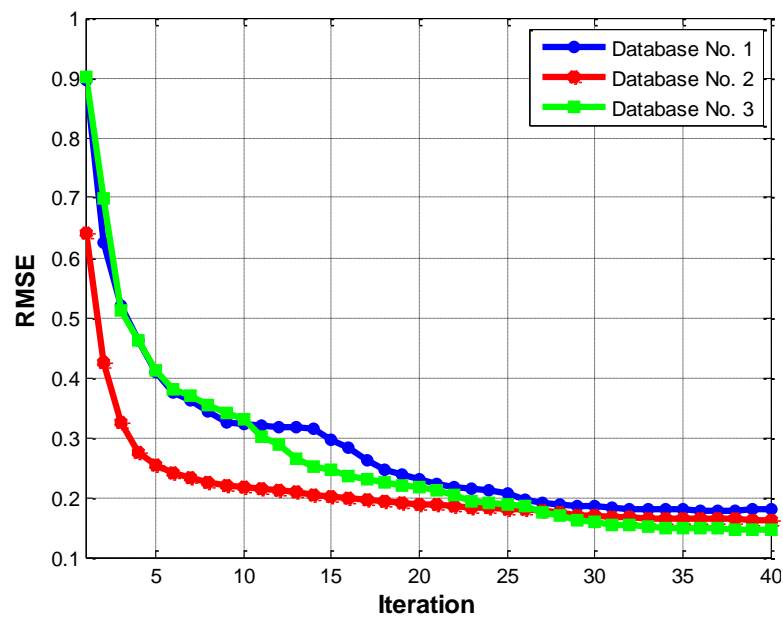


(ب)



(ج)

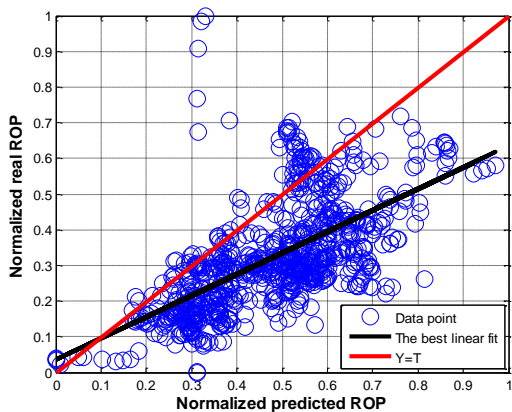
شکل ۹-۱۸. تحلیل باقیمانده با استفاده از نمودار Q-Q (سمت راست) و توزیع فراوانی (سمت چپ) برای:
 (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ در چاه RSA



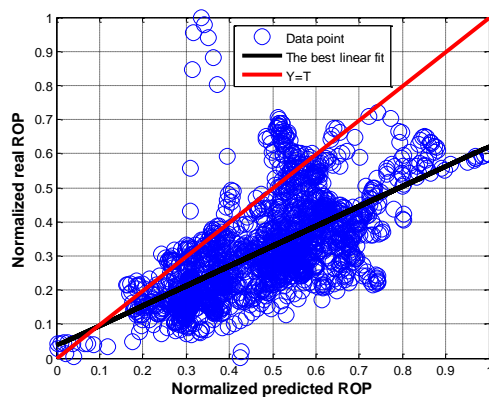
شکل ۹-۱۹. تغییرات خطا در تکرارهای مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های داده سطح اول چاه RSA

جدول ۹-۱۹. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA برای پایگاه‌های داده‌های سطح اول چاه RSA

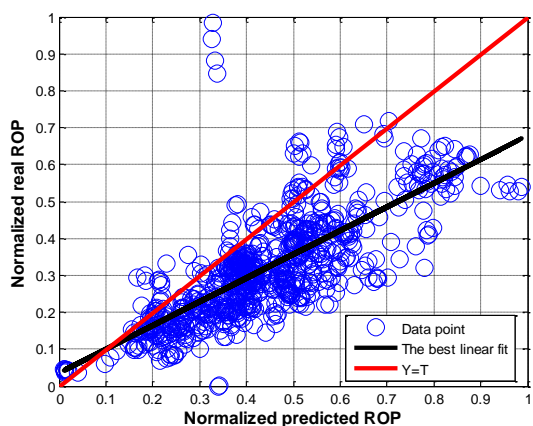
RMSE	R-Square	مرحله	شماره پایگاه داده
۰/۱۷۹	۰/۵۴۵	آموزش	۱
۰/۱۸۰	۰/۵۴۴	آزمون	
۰/۱۶۳	۰/۵۸۳	آموزش	۲
۰/۱۶۵	۰/۵۸۰	آزمون	
۰/۱۴۷	۰/۶۳۹	آموزش	۳
۰/۱۴۹	۰/۶۳۷	آزمون	



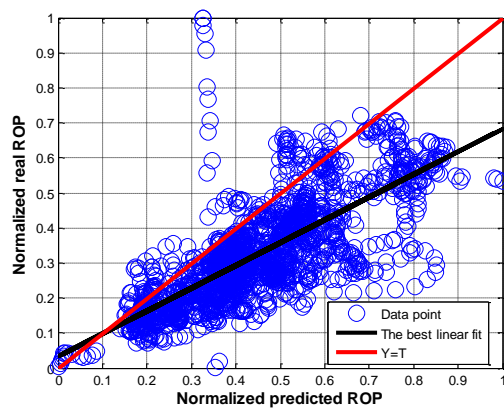
پایگاه داده ۱ (ب)



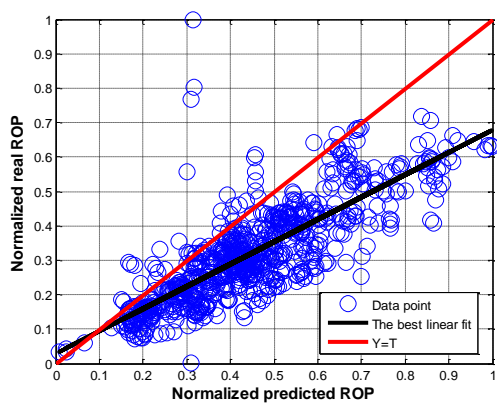
پایگاه داده ۱ (الف)



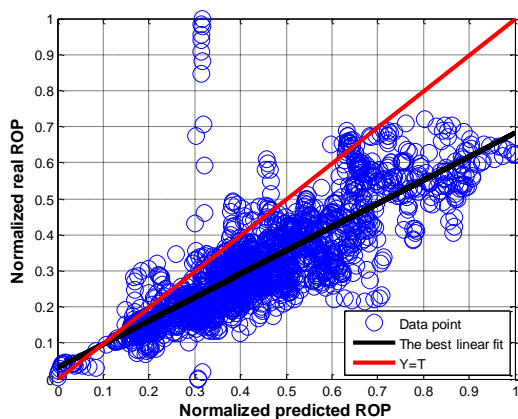
پایگاه داده ۲ (د)



پایگاه داده ۲ (ج)

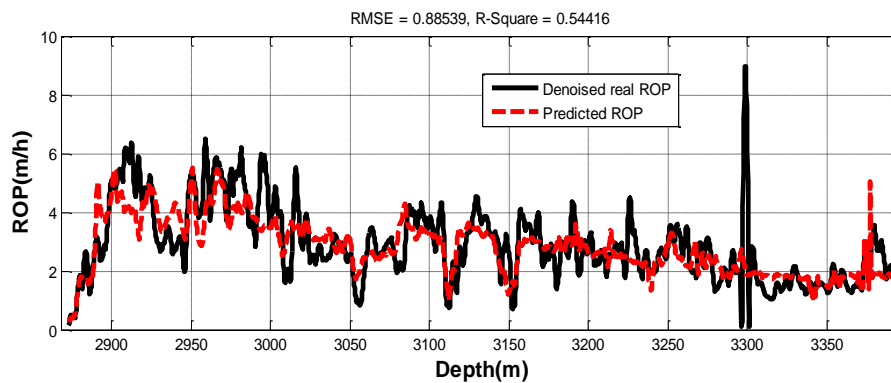


پایگاه داده ۳ (ه)

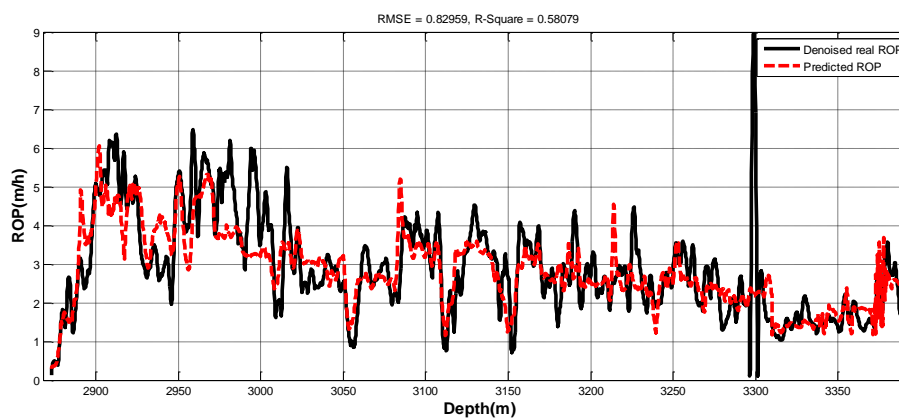


پایگاه داده ۳ (و)

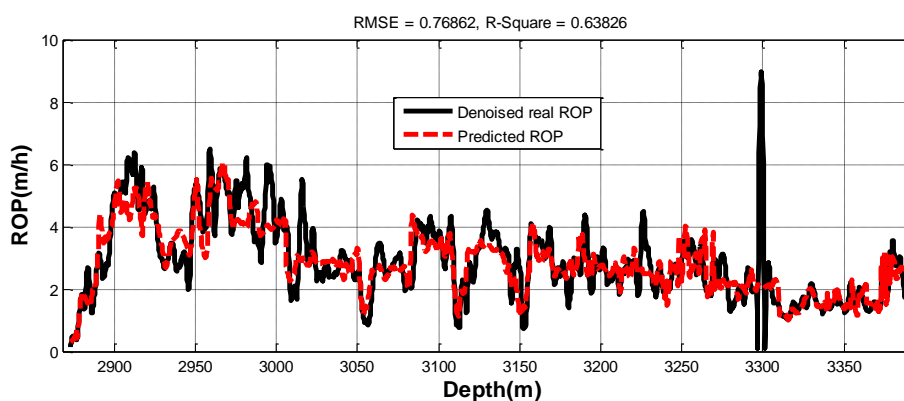
شکل ۹-۲۰. نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های مختلف سطح اول چاه RSA برای مرحله آموزش (الف، ج، و) و آزمون (ب، د، ه)



(الف)

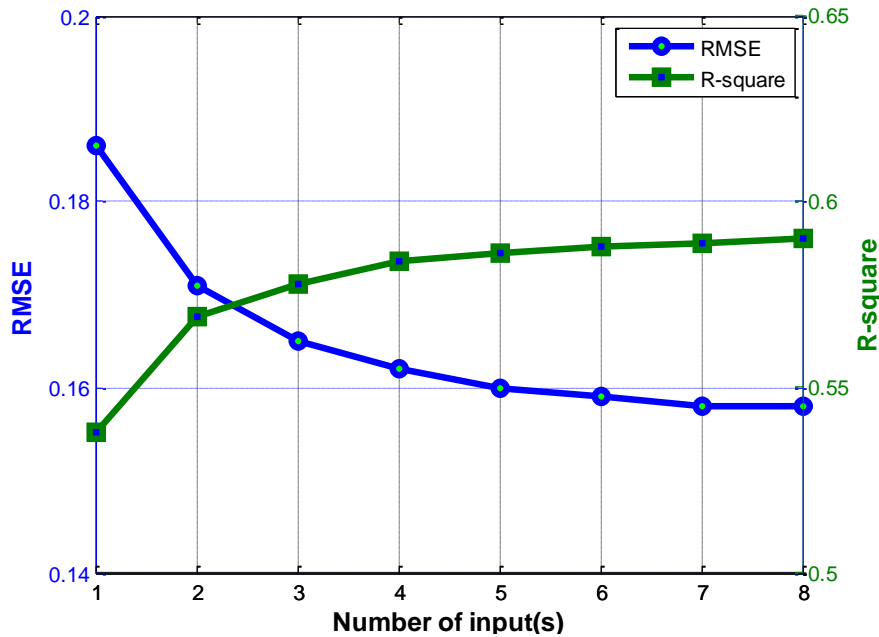


(ب)



(ج)

شکل ۹-۲۱. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های سطح اول چاه RSA: پایگاه (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳



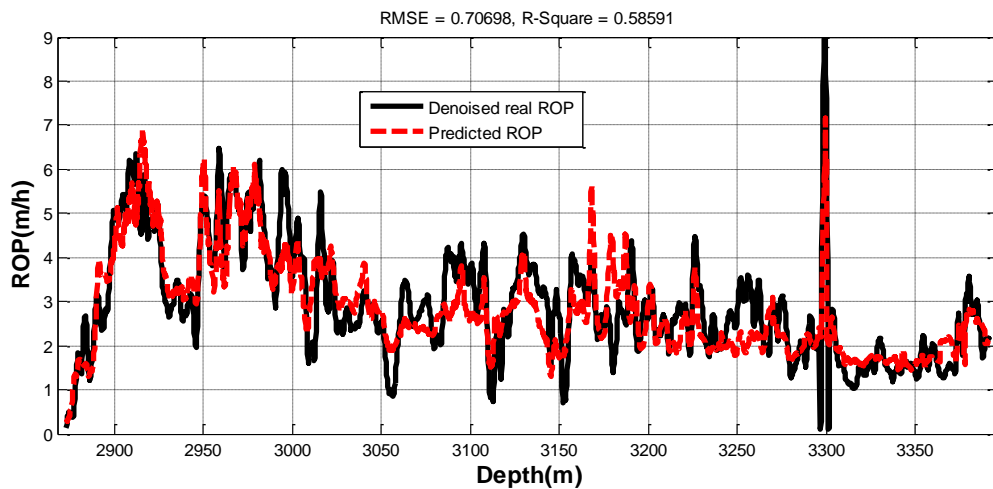
شکل ۹-۲۲. نمودار تغییرات خطا و ضریب همبستگی مدل تخمین گر نرخ حفاری به ازای تعداد متغیرهای انتخابی با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه RSA

جدول ۹-۲۰. نتیجه اعمال الگوریتم انتخاب ویژگی بر روی داده‌های سطح دوم چاه RSA (ویژگی‌های انتخاب شده با خط پررنگ نمایش داده شده است)

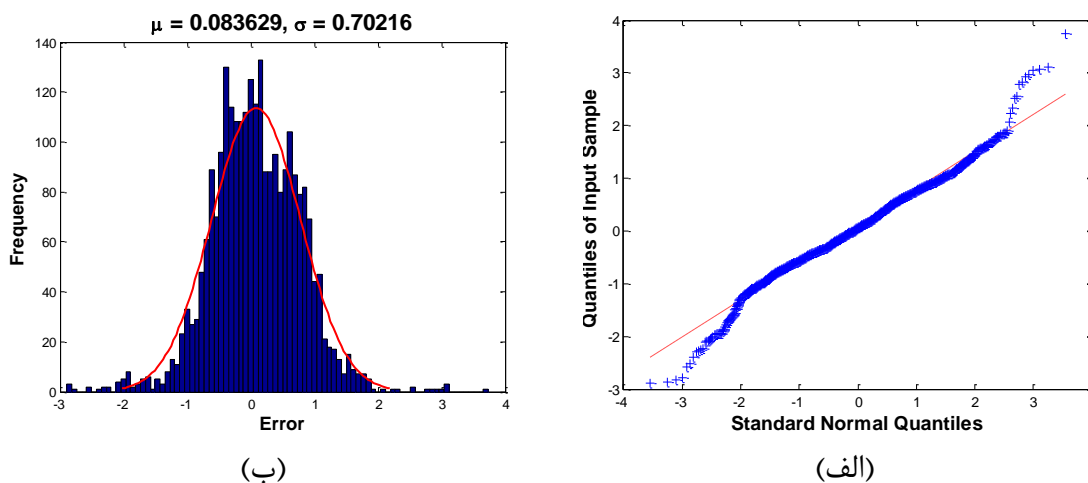
R-Square	RMSE	نوع ورودی‌ها	تعداد ورودی‌ها
۰/۵۳۸	۰/۱۸۶	RDI	۱
۰/۵۶۹	۰/۱۷۱	RDI, Tor	۲
۰/۵۷۸	۰/۱۶۵	RDI, Tor, WOB	۳
۰/۵۸۴	۰/۱۶۲	RDI, Tor, WOB, RPM	۴
۰/۵۸۶	۰/۱۶۰	RDI, Tor, WOB, RPM, FR	۵
۰/۵۸۸	۰/۱۵۹	RDI, Tor, WOB, RPM, FR, MD	۶
۰/۵۸۹	۰/۱۵۸	RDI, Tor, WOB, RPM, FR, MD, CT	۷
۰/۵۹۰	۰/۱۵۸	RDI, Tor, WOB, RPM, FR, MD, CT, MYP	۸

جدول ۹-۲۱. مدل حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح دو چاه RSA

RMSE	R-Square	رابطه	نام مدل
۰/۷۰۷	۰/۵۸۶	$\ln(ROP) = 2.104 - 0.7121RDI - 0.0652Tor - 0.2090WOB + 0.00068RPM + 0.00018FR + RDI \times (0.0412Tor + 0.0146WOB + 0.0031RPM - 0.00011FR) + Tor \times (0.0057WOB - 0.00067RPM) + 0.00042WOB \times RPM$	مدل شماره ۴



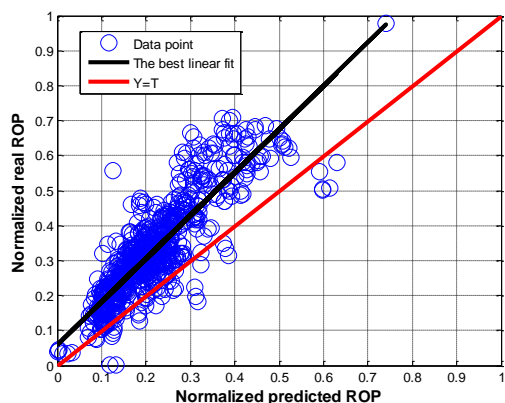
شکل ۹-۲۳. مقایسه نرخ نفوذ نوفه زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل شماره ۴ چاه RSA



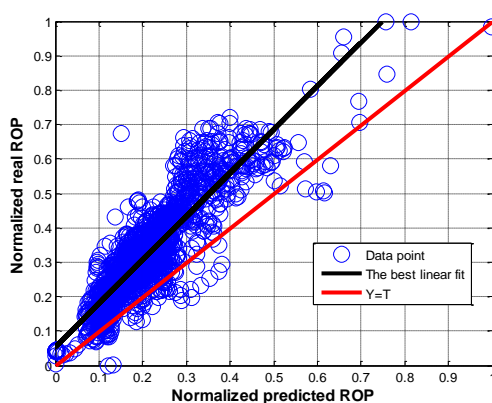
شکل ۹-۲۴. نمودار (الف) Q-Q و (ب) توزیع فراوانی خطا برای مدل رگرسیونی شماره ۴ چاه RSA

جدول ۹-۲۲. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA براساس داده‌های سطح دوم چاه RSA

مرحله	R-square	RMSE
آموزش	۰/۶۰۵	۰/۱۳۱
آزمون	۰/۶۰۰	۰/۱۳۲

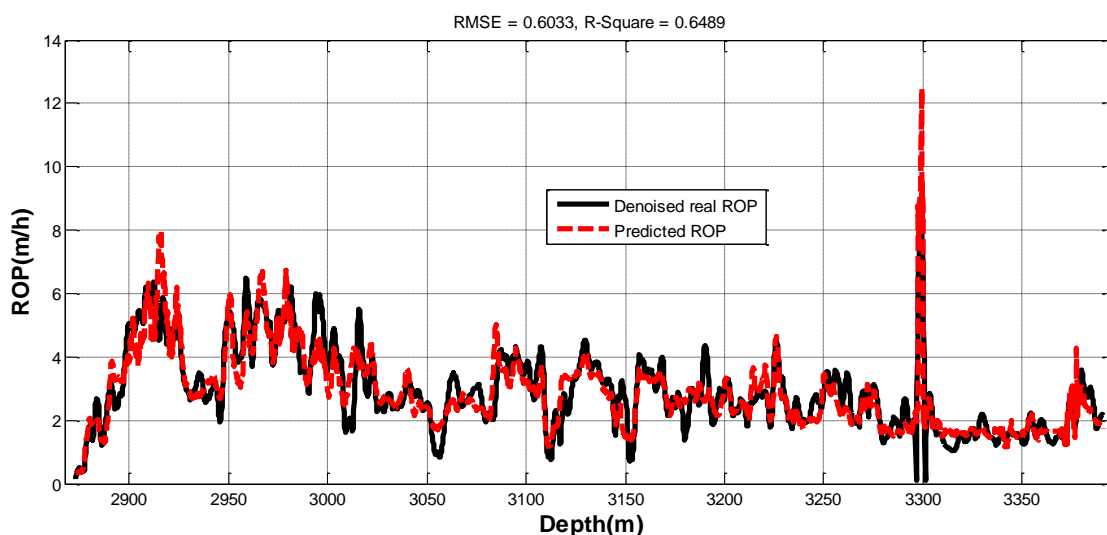


(ب)



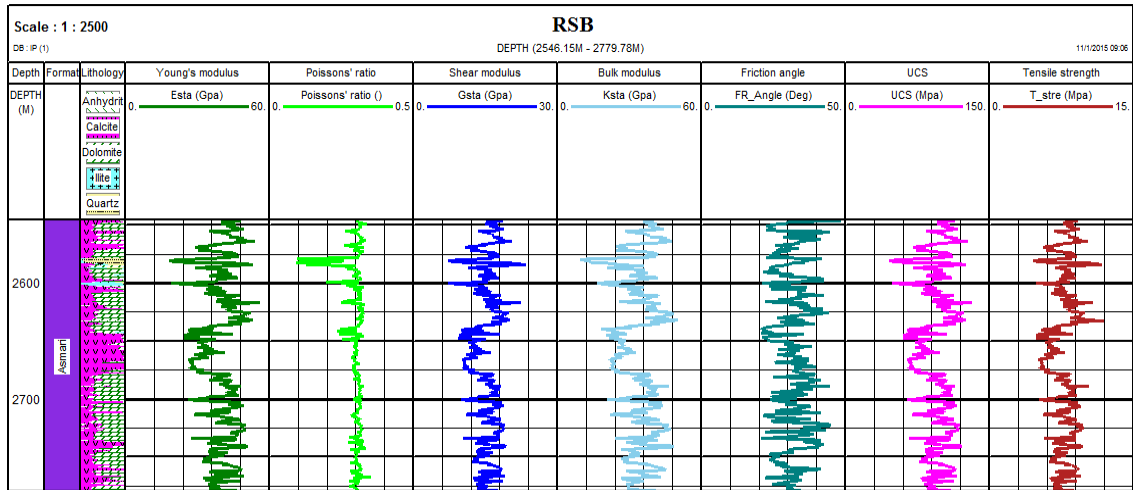
(الف)

شکل ۹-۲۵. نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نرمالیزه شده و تخمینی نرمالیزه شده با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه RSA در مرحله (الف) آموزش و (ب) آزمون

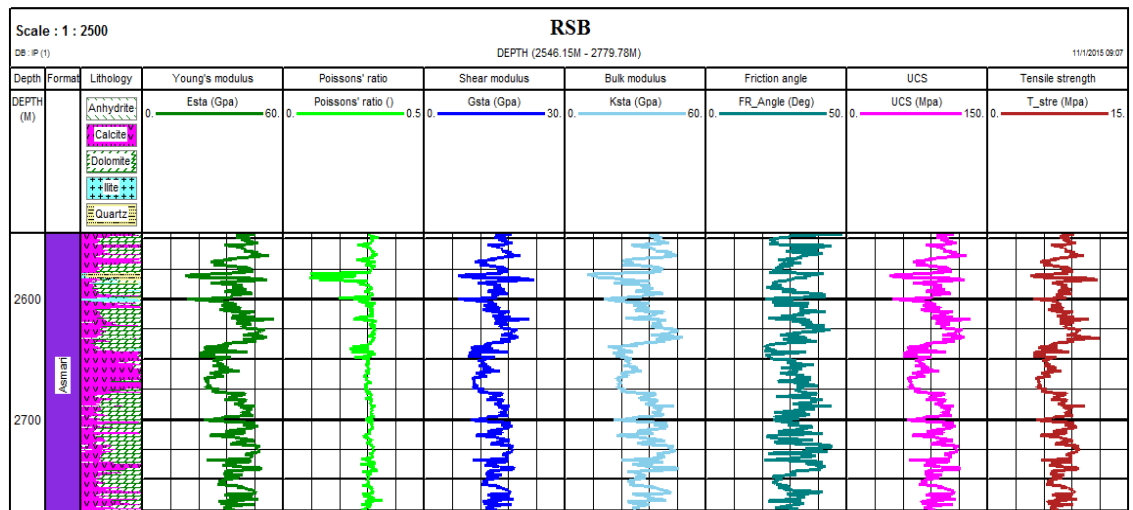


شکل ۹-۲۶. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل MLP-COA در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه RSA با داده‌های سطح دوم

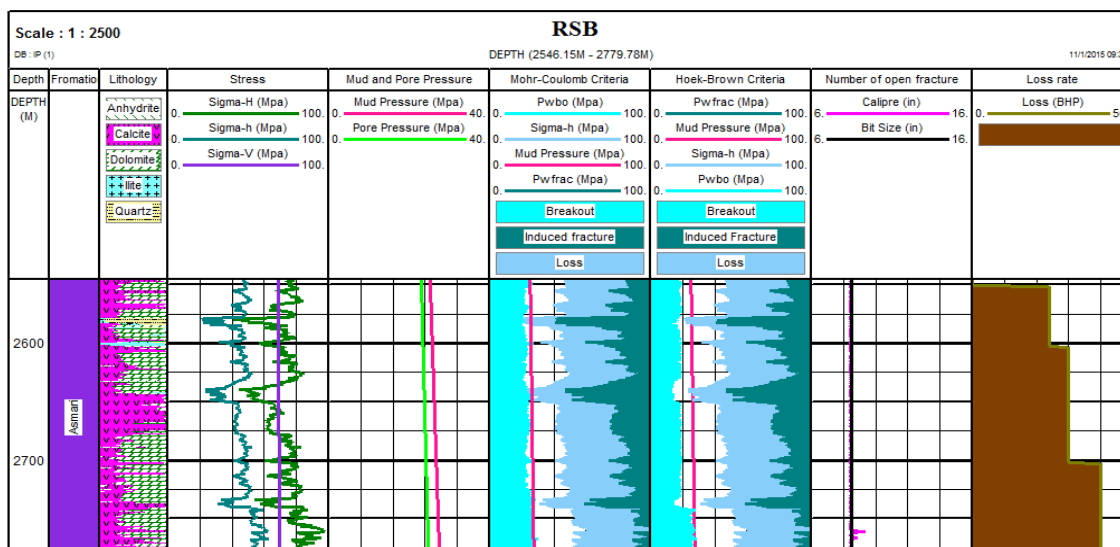
RSB ۳-۱-۹ چاه



شکل ۹-۲۷. نگارهای پتروفیزیکی مورد استفاده برای مدل سازی ژئومکانیکی یک بعدی چاه RSB



شکل ۹-۲۸. مقادیر ضرایب استاتیک و مقاومت سنگ تخمینی در محدوده عمقی مورد مطالعه در چاه RSB



شکل ۹-۲۹. پنجره ایمن وزن گل محاسبه شده براساس دو معیار موهر-کلمب و هوک-براون برای چاه RSB

جدول ۹-۲۳. ماتریس ضرایب همبستگی نگارهای پتروفیزیکی چاه RSB

	Depth									
Depth	۱/۰۰	Cal	RT		GR		RHOB		NPHI	
Cal	-۰/۴۱	۱/۰۰	RT		GR		RHOB		NPHI	
RT	-۰/۱۰	-۰/۱۴	۱/۰۰	GR	RHOB		NPHI		DTCO	
GR	-۰/۳۶	-۰/۱۷	-۰/۰۶	۱/۰۰	RHOB	NPHI		DTCO		DTSM
RHOB	-۰/۰۶	-۰/۶۱	۰/۳۰	-۰/۲۵	۱/۰۰	NPHI	DTCO		DTSM	
NPHI	۰/۴۸	-۰/۰۳	-۰/۳۸	۰/۰۲	-۰/۵۳	۱/۰۰	DTCO	DTSM		
DTCO	-۰/۱۴	۰/۵۸	-۰/۲۹	۰/۳۴	-۰/۹۴	۰/۴۶	۱/۰۰	DTSM		
DTSM	۰/۰۵	-۰/۶۶	-۰/۳۰	۰/۳۰	-۰/۹۶	۰/۵۱	۰/۹۶	۱/۰۰		

جدول ۹-۲۴. ماتریس ضرایب همبستگی ویژگی‌های سنگ چاه RSB

	E																		
E	۱/۰۰	ν																	
ν	۰/۵۲	۱/۰۰	G																
G	۱/۰۰	۰/۴۵	۱/۰۰	K															
K	۰/۹۷	۰/۷۰	۰/۹۵	۱/۰۰	λ														
λ	۰/۹۵	۰/۷۶	۰/۹۲	۱/۰۰	۱/۰۰	V_{Sh}													
V_{Sh}	-۰/۳۰	-۰/۳۵	-۰/۲۶	-۰/۳۶	-۰/۳۶	۱/۰۰	ϕ												
ϕ	۰/۴۵	۰/۴۱	۰/۴۳	۰/۵۰	۰/۵۴	-۰/۷۰	۱/۰۰	UCS											
UCS	۱/۰۰	۰/۵۲	۱/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۵	-۰/۳۶	۰/۴۵	۱/۰۰	TS										
TS	۰/۹۷	۰/۳۴	۰/۹۹	۰/۹۰	۰/۸۶	-۰/۱۹	۰/۳۹	۰/۹۷	۱/۰۰	CCS									
CCS	۰/۹۴	۰/۴۸	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۸۸	-۰/۳۵	۰/۵۰	۰/۹۴	۰/۹۲	۱/۰۰	PP								
PP	۰/۰۱	۰/۳۳	-۰/۰۲	-۰/۱۰	۰/۱۳	-۰/۳۶	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۱	۱/۰۰								

جدول ۹-۲۵. ماتریس ضرایب همبستگی پارامترهای عملیاتی چاه RSB

	MV																		
MV	۱/۰۰	MPV																	
MPV	۱/۰۰	۱/۰۰	MYP																
MYP	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	SC															
SC	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۱/۰۰	MWR														
MWR	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۰۵	۰	۱/۰۰	MO													
MO	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۰۹	۰	۰	۱/۰۰	ECD												
ECD	-۰/۳۸	-۰/۳۸	-۰/۳۸	-۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۱	۱/۰۰	CT											
CT	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۸۳	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۵	-۰/۴۱	۱/۰۰	WOB										
WOB	-۰/۱۹	-۰/۱۸	-۰/۱۸	۰/۱۲	۰/۰۸	-۰/۰۴	-۰/۰۹	-۰/۴۲	۱/۰۰	RPM									
RPM	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۰۰	Tor								
Tor	-۰/۲۴	-۰/۲۴	-۰/۲۴	۰/۰۷	-۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۴۸	-۰/۰۲	-۰/۲۱	۰	۱/۰۰	PuP							
PuP	-۰/۶۸	-۰/۶۸	-۰/۶۸	-۰/۰۵	۰/۱۳	-۰/۰۷	۰/۲۹	-۰/۸۶	۰/۳۶	۰	-۰/۰۵	۱/۰۰	MD						
MD	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۰۰	۰	۰	۱/۰۰	FR					
FR	-۰/۶۹	-۰/۶۹	-۰/۶۹	-۰/۰۶	۰/۱۳	-۰/۰۸	۰/۲۹	-۰/۷۶	۰/۲۴	۰	-۰/۰۷	۰/۸۷	۰	۱/۰۰					

جدول ۹-۲۶. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و نگارهای پتروفیزیکی چاه RSB

نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
عمق	$ROP = -0.000029 \times Depth^2 + 0.1538 \times Depth - 195.7511$	۰/۰۴۱	۱/۰۶۰
مقاومت ویژه	$ROP = -0.0000295 \times RT^2 + 0.00664 \times RT + 5.0685$	۰/۰۰۵	۱/۰۸۳
گاما	$ROP = -0.0011 \times GR^2 + 0.0757 \times GR + 3.9261$	۰/۰۰۵	۱/۰۸۳
تخلخل	$ROP = 233.9828 \times NPHI^2 - 55.0272 \times NPHI + 8.21$	۰/۰۵۱	۱/۰۵۷
چگالی	$ROP = 16.3636 \times e^{-0.4313 \times RHOB}$	۰/۰۲۴	۱/۰۷۰
کندی موج فشاری	$ROP = 2.9877 \times e^{0.0095 \times DTCO}$	۰/۰۲۷	۱/۰۶۸
کندی موج برشی	$ROP = 1.8824 \times e^{0.0093 \times DTSM}$	۰/۰۵۵	۱/۰۵۳

جدول ۹-۲۷. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و ویژگی‌های ژئومکانیکی چاه RSB

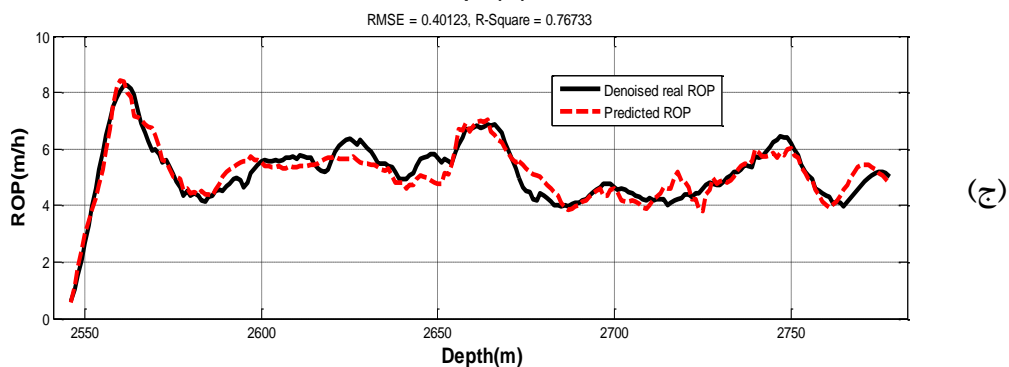
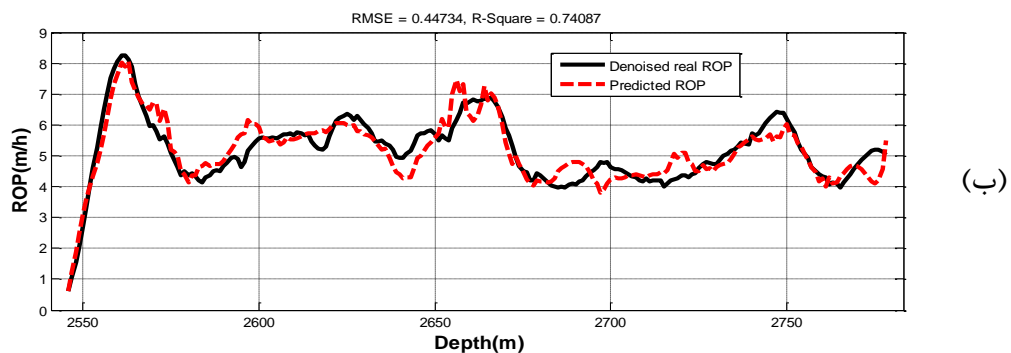
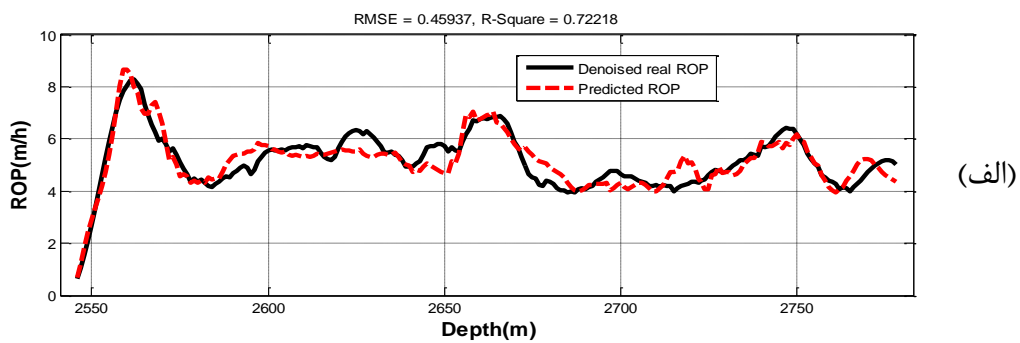
نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
ضریب پواسون	$ROP = -623.0237 \times \nu^2 + 361.571 \times \nu - 47.0671$	۰/۰۴۰	۱/۰۶۳
حجم شیل	$ROP = -9.3083 \times V_{sh}^2 + 3.6471 \times V_{sh} + 4.876$	۰/۰۰۵	۱/۰۸۳
زاویه اصطکاک داخلی	$ROP = 4.2276 \times e^{0.00634 \times \phi}$	۰/۰۰۸	۱/۰۷۹
مقاومت فشاری محصور شده	$ROP = 8.861 \times e^{-0.00455 \times CCS}$	۰/۱۵۱	۰/۹۹۸
فشاری منفذی	$ROP = -0.52753 \times PP^2 + 24.8677 \times PP - 287.6993$	۰/۰۴۱	۱/۰۶۳

جدول ۹-۲۸. بهترین روابط برازش شده بین نرخ نفوذ و پارامترهای عملیاتی چاه RSB

نام پارامتر	رابطه	R-square	RMSE
ضریب گرانیروی گل	$ROP = 12.5428 \times e^{-0.029576 \times MV}$	۰/۰۳۹	۱/۰۶۲
گرانیروی پلاستیک گل	$ROP = 5.3991 \times e^{-0.014788 \times MPV}$	۰/۰۳۹	۱/۰۶۲
حد تسلیم گل	$ROP = 5.3991 \times e^{-0.014788 \times MYP}$	۰/۰۳۹	۱/۰۶۲
محتوای جامد گل	$ROP = 5.7433 \times e^{-0.028199 \times SC}$	۰/۰۰۰۸	۱/۰۸۳
محتوای آب گل	$ROP = 269.9507 \times \ln(MWR) - 1232.5546$	۰/۰۰۲	۱/۰۶۸
محتوای نفت گل	-	-	-
چگالی معادل در جریان	$ROP = 1.0101 \times e^{0.026932 \times ECD}$	۰/۰۵۷	۱/۰۵۱
ضریب سائیدگی دندانته مته	$ROP = 5.5006 \times e^{-0.048106 \times CT}$	۰/۰۲۷	۱/۰۶۸
وزن روی مته	$ROP = 0.04499 \times WOB - 1.0658 \times WOB + 11.1331$	۰/۱۴۱	۱/۰۰۶
سرعت دوران	$ROP = 5.1488 \times e^{0.000444 \times RPM}$	9×10^{-16}	۱/۰۸۱
گشتاور	$ROP = 6.1043 \times e^{-0.000232 \times Tor}$	۰/۰۲۷	۱/۰۶۸
فشار پمپ	$ROP = 3.6285 \times e^{0.000468 \times PuP}$	۰/۱۱۱	۱/۰۲۱
چگالی گل	$ROP = 5.1469 \times e^{0.000079 \times MD}$	$4/44 \times 10^{-16}$	۱/۰۸۱
نرخ جریان	$ROP = 1.1444 \times e^{0.003428 \times FR}$	۰/۳۳۱	۰/۸۸۶

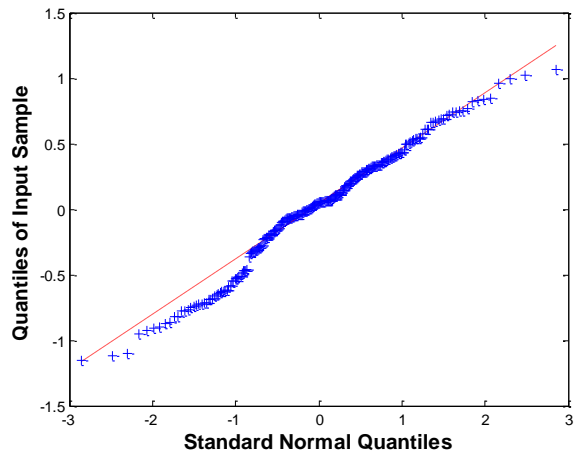
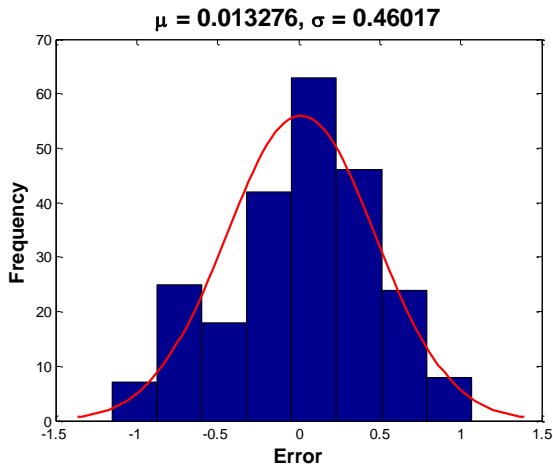
جدول ۹-۲۹. مدل‌های حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های چاه RSB

نام مدل	رابطه	R-Square	RMSE
مدل شماره ۱	$ROP = e^{(124.73 - 1.9826ECD + 0.2028WOB + 0.0182Tor + 0.0924PuP - 0.4915FR)} \times e^{(ECD \times (0.008FR - 0.0106WOB - 0.0003Tor - 0.0015PuP))} \times e^{(PuP \times (-0.00026WOB + 5.3 \times 10^{-6}Tor - 8.14 \times 10^{-6}FR))} \times e^{(FR \times (0.0015WOB - 1.05 \times 10^{-5}Tor))}$	۰/۷۲۲	۰/۴۵۹
مدل شماره ۲	$ROP = e^{(0.00042 + 1.17 \times 10^{-9}DTCO + 3.874 \times 10^{-19}ECD + 0.00015Tor + 8.7 \times 10^{-11}PuP + 9.37 \times 10^{-7}FR)} \times e^{(DTCO \times (1.39 \times 10^{-5}Tor + 0.0016PuP + 1.34 \times 10^{-15}FR))} \times e^{(ECD \times (5.94 \times 10^{-12}Tor + 2.52 \times 10^{-19}PuP + 1.25 \times 10^{-21}FR))} \times e^{(Tor \times (3.92 \times 10^{-15}PuP + 4.81 \times 10^{-7}FR))}$	۰/۷۴۱	۰/۴۴۷
مدل شماره ۳	$ROP = e^{(56.282 - 0.0697CCS - 0.7796ECD + 0.0179Tor + 0.0357PuP - 0.2216FR)} \times e^{(CCS \times (0.0002FR - 2.65 \times 10^{-5}Tor))} \times e^{(ECD \times (0.0035FR - 0.00078PuP - 0.00019Tor))} \times e^{(Tor \times (1.002 \times 10^{-5}PuP - 2.52 \times 10^{-5}FR))} \times e^{PuP \times (8.36 \times 10^{-6}FR)}$	۰/۷۶۷	۰/۴۰۱

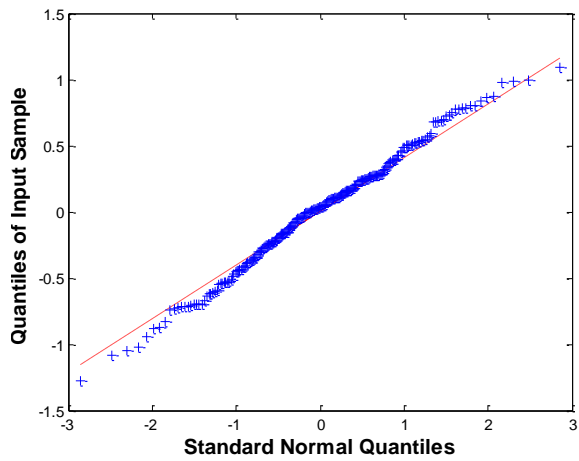
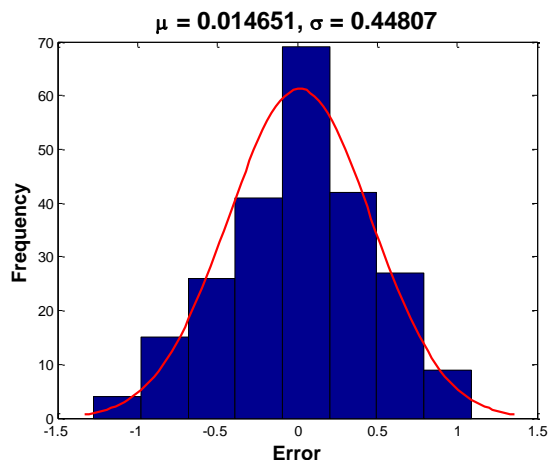


شکل ۹-۳۰. مقایسه نرخ نفوذ تخمینی در چاه RSB با استفاده از داده‌های انتخاب شده پایگاه داده سطح

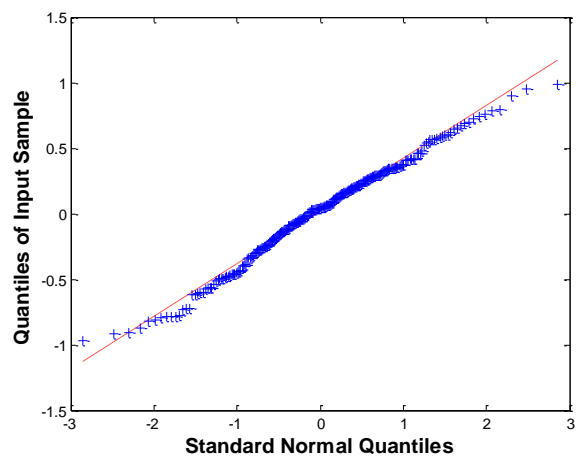
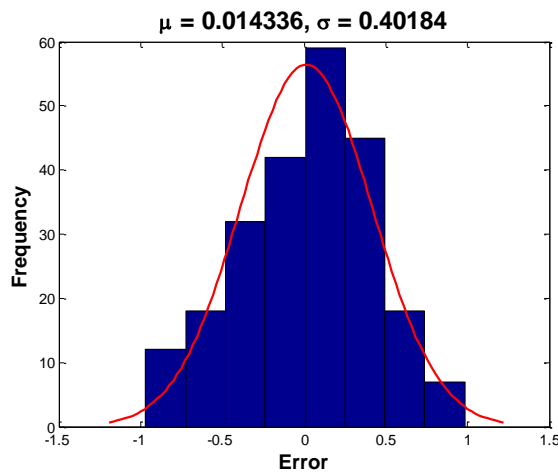
اول: (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳



(الف)

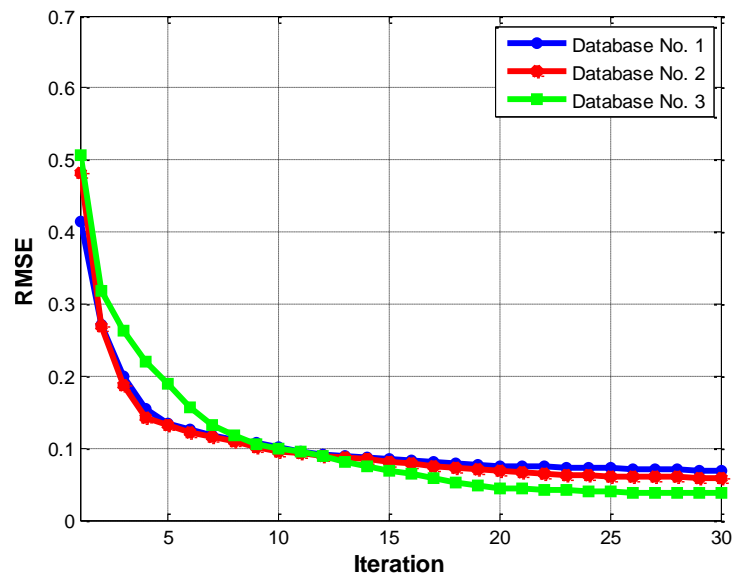


(ب)



(ج)

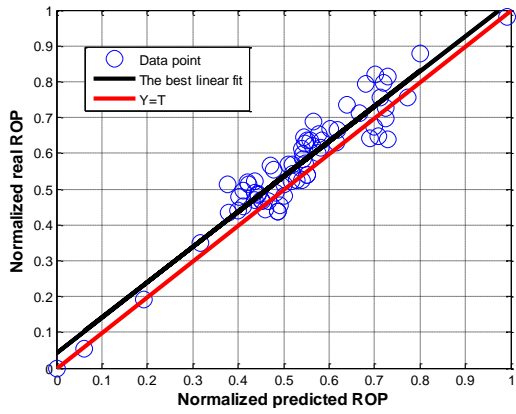
شکل ۹-۳۱. تحلیل باقیمانده با استفاده از نمودار Q-Q (سمت راست) و توزیع فراوانی (سمت چپ) برای: (الف) مدل شماره ۱، (ب) مدل شماره ۲ و (ج) مدل شماره ۳ در چاه RSB



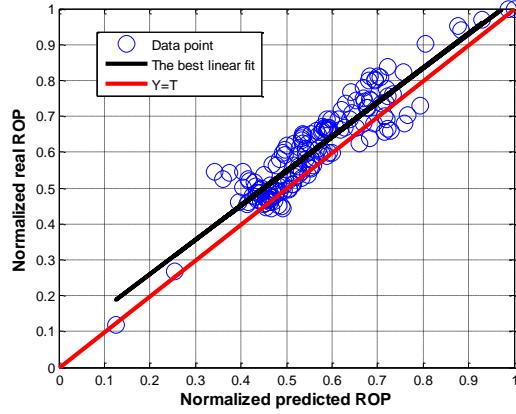
شکل ۹-۳۲. تغییرات خطا در تکرارهای مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های سطح اول داده چاه RSB

جدول ۹-۳۰. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA برای پایگاه‌های سطح اول داده چاه RSB

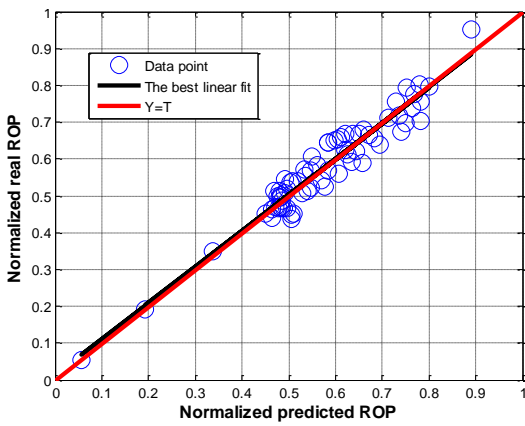
RMSE	R-Square	مرحله	شماره پایگاه داده
۰/۰۶۸	۰/۷۵۷	آموزش	۱
۰/۰۷۴	۰/۷۵۴	آزمون	
۰/۰۵۹	۰/۸۰۶	آموزش	۲
۰/۰۶۰	۰/۸۰۳	آزمون	
۰/۰۳۷	۰/۸۳۴	آموزش	۳
۰/۰۳۹	۰/۸۳۲	آزمون	



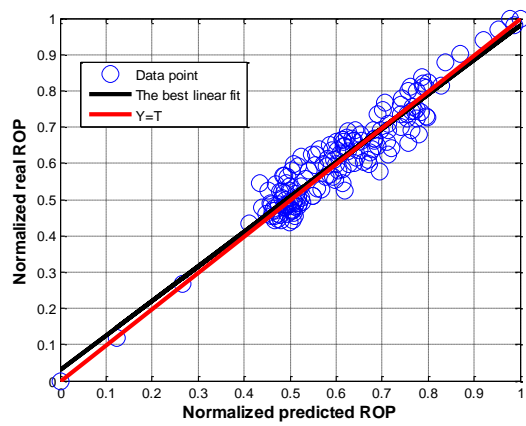
پایگاه داده ۱ (ب)



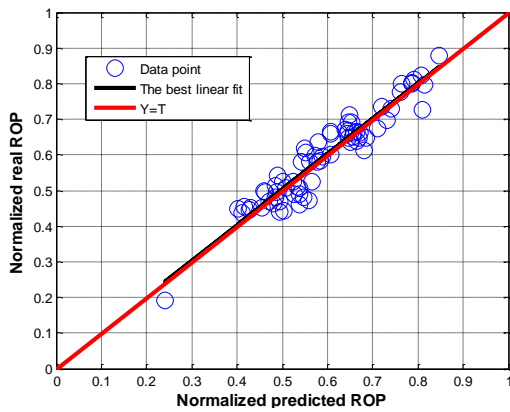
پایگاه داده ۱ (الف)



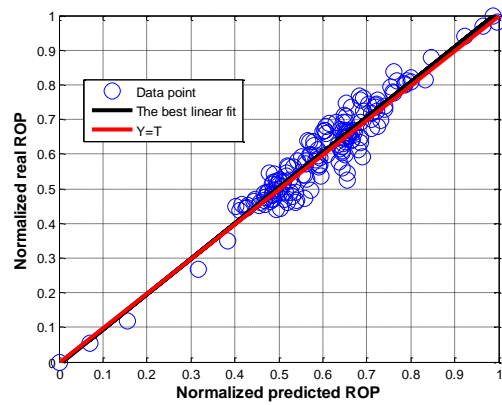
پایگاه داده ۲ (د)



پایگاه داده ۲ (ج)

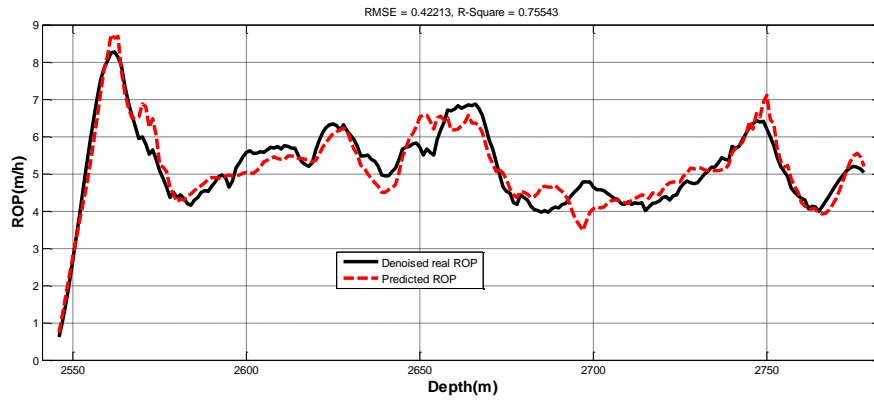


پایگاه داده ۳ (ه)

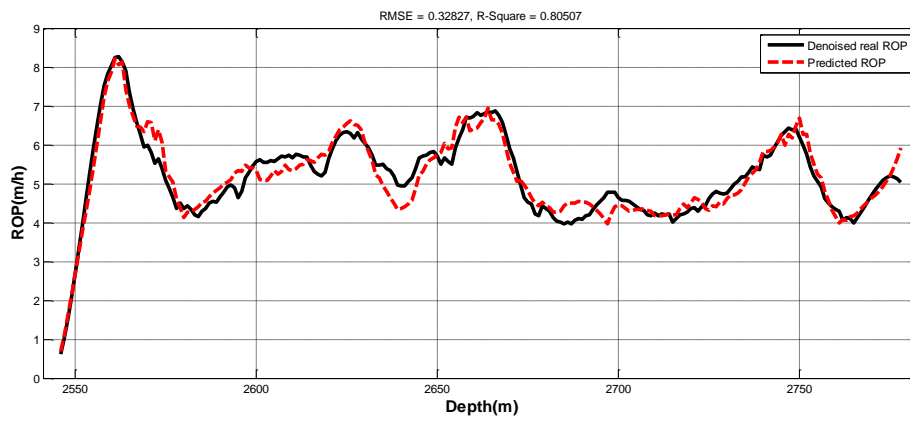


پایگاه داده ۳ (و)

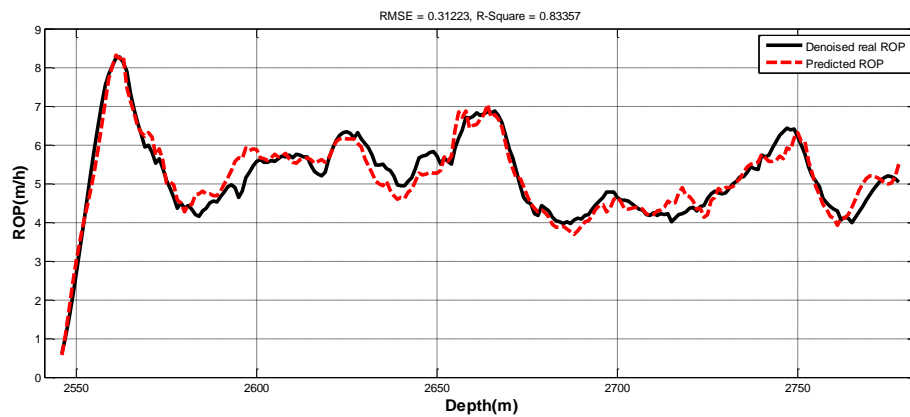
شکل ۹-۳۳. نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های پایگاه‌های مختلف سطح اول چاه RSB برای مرحله آموزش (الف، ج، و) و آزمون (ب، د، ه)



(الف)

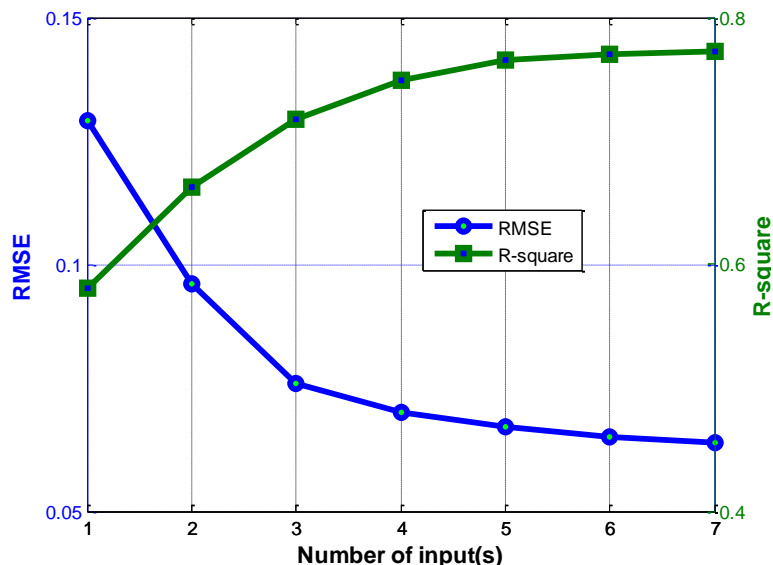


(ب)



(ج)

شکل ۹-۳۴. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ واقعی نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA با استفاده از داده‌های سطح اول چاه RSB: پایگاه (الف) شماره ۱، (ب) شماره ۲ و (ج) شماره ۳



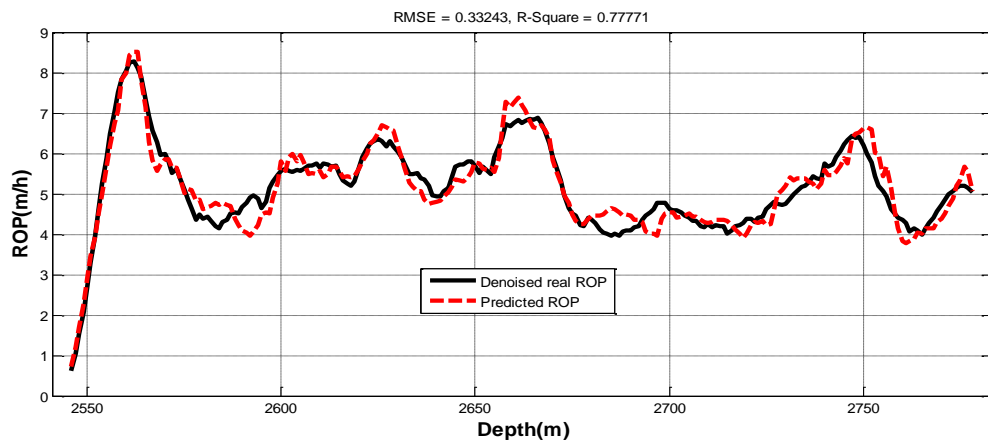
شکل ۹-۳۵. نمودار تغییرات خطا و ضریب همبستگی به ازای تعداد ورودی‌های انتخاب شده از داده‌های سطح دوم چاه RSB

جدول ۹-۳۱. نتیجه اعمال الگوریتم انتخاب ویژگی بر روی داده‌های سطح دوم چاه RSB (ویژگی‌های انتخاب شده با خط پررنگ نمایش داده شده است)

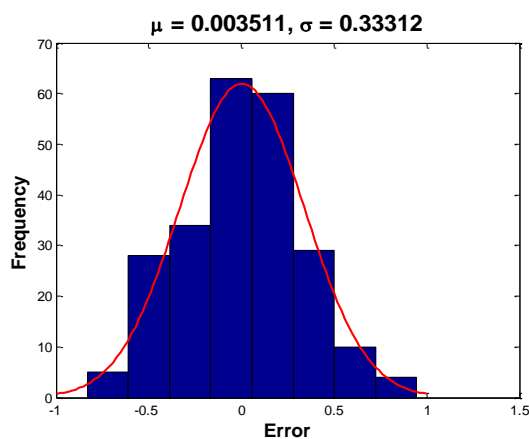
R-Square	RMSE	نوع ورودی‌ها	تعداد ورودی‌ها
۰/۵۸۱	۰/۱۲۹	RDI	۱
۰/۶۶۲	۰/۰۹۶	RDI, WOB	۲
۰/۷۱۷	۰/۰۷۶	RDI, WOB, ECD	۳
۰/۷۴۹	۰/۰۷۰	RDI, WOB, ECD, PuP	۴
۰/۷۶۶	۰/۰۶۷	RDI, WOB, ECD, PuP, PP	۵
۰/۷۷۰	۰/۰۶۵	RDI, WOB, ECD, PuP, PP, FR	۶
۰/۷۷۲	۰/۰۶۴	RDI, WOB, ECD, PuP, PP, FR, CT	۷

جدول ۹-۳۲. مدل حاصل از اعمال روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های سطح دو چاه RSB

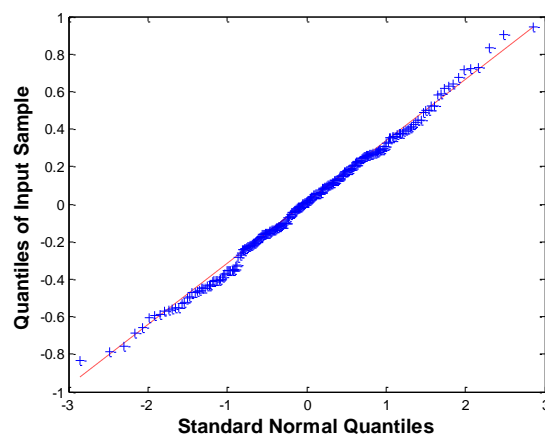
RMSE	R-Square	رابطه	نام مدل
۰/۳۳۲	۰/۷۷۸	$\ln(ROP) = 211.87 + 22.336RDI - 7.7192PP - 4.6695ECD - 0.3694WOB - 0.0297PuP + RDI \times (-0.8583PP - 0.0022PuP) + ECD \times (0.1739PP + 0.0054WOB + 0.00059PuP) + 0.0001WOB \times PuP$	مدل شماره ۴



شکل ۹-۳۶. مقایسه نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نرخ نفوذ تخمینی از مدل شماره ۴ چاه RSB



(ب)

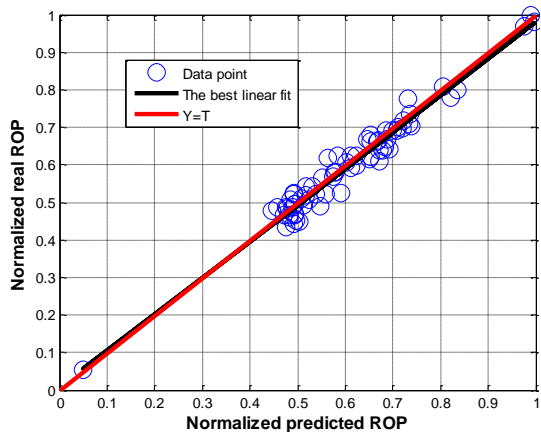


(الف)

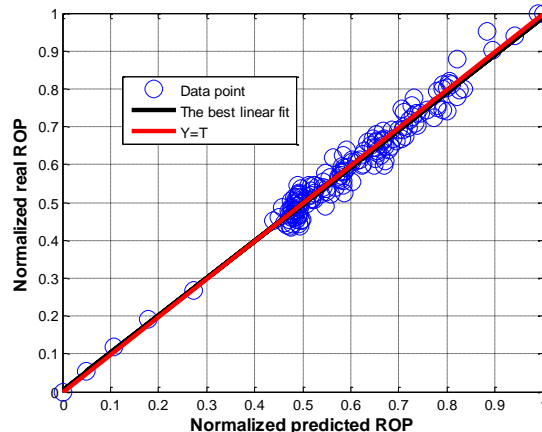
شکل ۹-۳۷. نمودار (الف) Q-Q و (ب) توزیع فراوانی خطا برای مدل رگرسیونی شماره ۴ چاه RSB

جدول ۹-۳۳. مقایسه مرحله آموزش و آزمون مدل MLP-COA براساس داده‌های سطح دوم چاه RSB

مرحله	R-square	RMSE
آموزش	۰/۸۶۳	۰/۰۲۶
آزمون	۰/۸۶۰	۰/۰۲۸

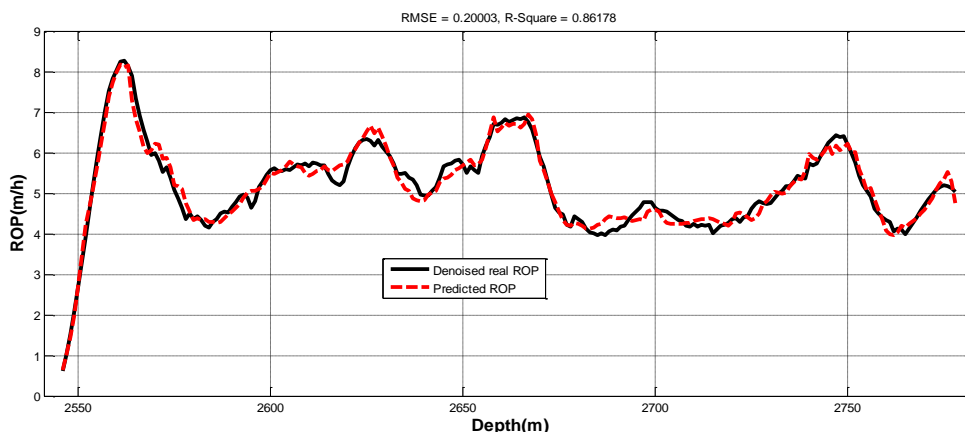


(ب)



(الف)

شکل ۹-۳۸. نمودار متقاطع نرخ نفوذ واقعی نرمالیزه شده و تخمینی نرمالیزه شده با استفاده از داده‌های سطح دوم چاه RSB در مرحله (الف) آموزش و (ب) آزمون



شکل ۹-۳۹. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و تخمینی از مدل MLP-COA در محدوده عمقی مورد مطالعاتی چاه RSB با داده‌های سطح دوم

۹-۲. پیوست شماره ۲

در این قسمت به اهمیت مرحله نوفه‌زدایی از داده‌های گردآوری شده از چاه‌های مورد مطالعه اشاره خواهد شد. برای مشخص نمودن ارزش این مرحله از پیش پردازش؛ ابتدا، دو مدل نرخ نفوذ با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه و الگوریتم بهینه‌سازی فاخته برای یکی از چاه‌های مورد مطالعه (چاه KrA) ایجاد خواهند شد. یکی از این دو مدل با استفاده از داده‌های نوفه‌دار (داده‌های برداشت شده در چاه) و دیگری با داده‌های نوفه‌زدایی شده آموزش داده خواهد شد. مقایسه این دو مدل در دو مرحله انجام خواهد شد. در مرحله اول مقایسه‌ای بین نتایج این دو مدل در چاه آموزش انجام خواهد شد و در مرحله دوم، با استفاده از این دو مدل آموزش دیده شده، به تخمین نرخ نفوذ در چاه دیگر پرداخته خواهد شد.

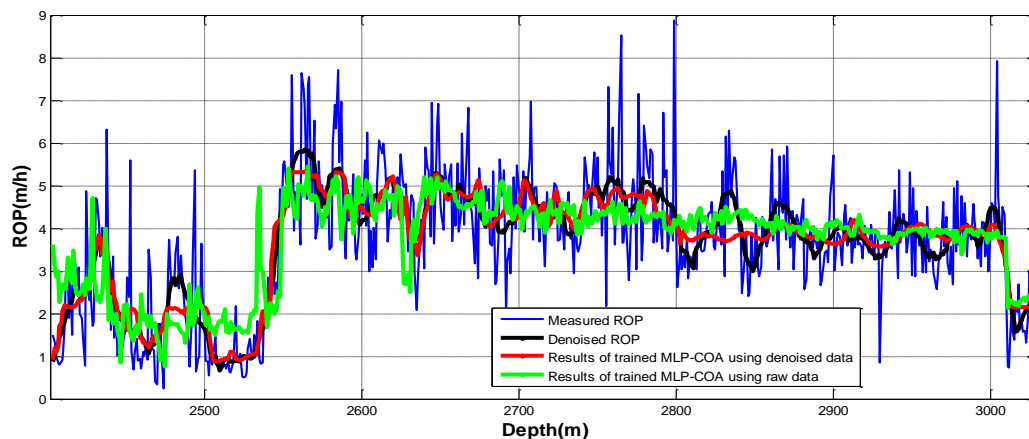
۹-۲-۱. مرحله اول

برای آموزش مدل شبکه عصبی از داده‌های پایگاه شماره ۳ سطح اول استفاده شد. به منظور انتخاب بهترین پارامترهای تأثیرگذار در نرخ نفوذ، روش جستجوی افزودن l_1 حذف l_2 بر روی داده‌های نوفه‌دار پیاده و مشخصات الگوریتم انتخاب ویژگی همانند بخش ۵-۸ در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج این الگوریتم، شش پارامتر؛ گشتاور، وزن روی مته، چگالی معادل در جریان، سرعت دوران، مقاومت فشاری محصور شده و نرخ جریان برای مدل‌سازی نرخ نفوذ انتخاب شدند. بنابراین، برای ایجاد شرایط برابر برای هر دو مدل شبکه عصبی، این پارامترها از داده‌های بدون نوفه نیز انتخاب شدند. ۷۰ درصد از داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون آن استفاده شد. در جدول ۹-۳۴ مقادیر ضرایب تعیین و خطای دو مدل در مقایسه با نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده و نوفه‌دار ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود مدل مبتنی بر داده‌های نوفه‌زدایی شده، در تخمین نرخ نفوذ، از دقت بالاتری نسبت به مدل دیگر برخوردار است. مقادیر نرخ نفوذ تخمینی با استفاده از این دو مدل، در مقایسه با نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده و نوفه‌زدایی شده، در محدوده عمقی مورد مطالعه چاه KfA، در شکل ۹-۴۰ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مدل مبتنی بر داده‌های نوفه‌زدایی شده به خوبی روند اصلی تغییرات نرخ نفوذ مشاهده شده را پیش‌بینی کرده است. این در حالی است که نرخ نفوذ تخمینی با استفاده از مدل دیگر در برخی نقاط عمقی نسبت به نرخ نفوذ مشاهده شده انحراف شدیدی دارد.

جدول ۹-۳۴. مقایسه دو مدل آموزش دیده با استفاده از داده‌های نوفه‌دار و نوفه‌زدایی شده چاه KfA

براساس مقادیر خطا و ضریب تعیین

مقایسه با نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده		مقایسه با نرخ نفوذ نوفه‌دار		نام مدل
RMSE	R-square	RMSE	R-square	
۰/۵۶۲	۰/۷۵۱	۰/۹۳۷	۰/۶۵۳	Noisy MLP-COA
۰/۴۵۰	۰/۸۶۳	۰/۸۱۶	۰/۶۹۷	Denosed MLP-COA



شکل ۹-۴۰. مقایسه میان مقادیر نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده (نوفه‌دار)، نوفه‌زدایی شده، تخمینی با داده‌های نوفه‌دار و تخمینی با داده‌های نوفه‌زدایی شده در چاه KrA

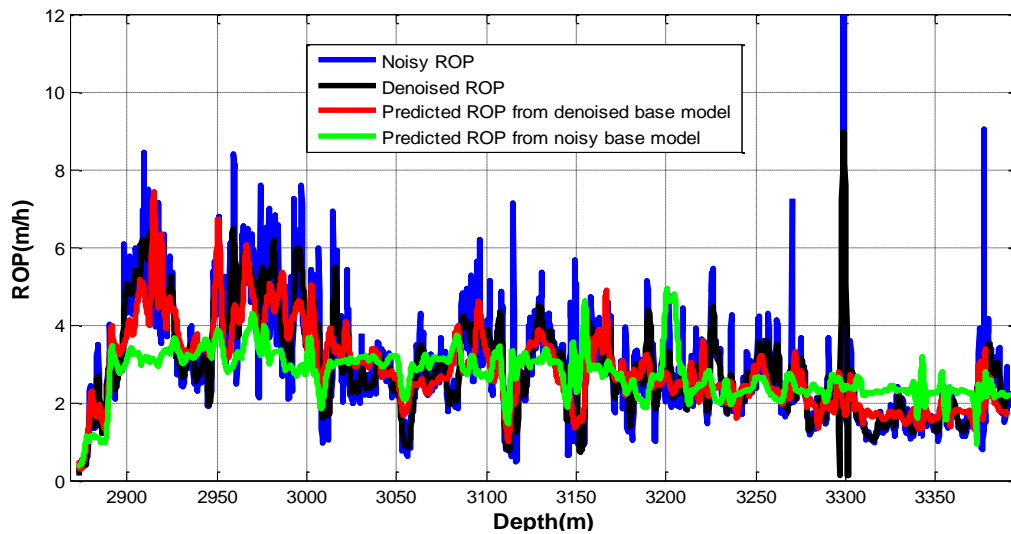
۹-۲-۲. مرحله دوم

در این بخش، برای اعتبارسنجی دو مدل آموزش دیده با داده‌های چاه KrA یعنی مدل مبتنی بر داده‌های نوفه‌دار و مدل مبتنی بر داده‌های نوفه‌زدایی شده، به تخمین نرخ حفاری در چاه RSA با استفاده از این دو مدل پرداخته خواهد شد. برای این منظور دو پایگاه داده از پارامترهای گشتاور، وزن روی مته، چگالی معادل در جریان، سرعت دوران، مقاومت فشاری محصور شده و نرخ جریان به عنوان ورودی مدل آموزش دیده شده، تشکیل شد. در پایگاه اول، پارامترهای نوفه‌دار و در پایگاه دوم، پارامترهای نوفه‌زدایی شده چاه RSA قرار دارند. در جدول ۹-۳۵ مقایسه این دو مدل براساس خطا و ضرایب تعیین برای داده‌های چاه RSA نشان داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود؛ مدل آموزش دیده با داده‌های نوفه‌زدایی شده از دقت و ضریب تعیین بیشتری نسبت به مدل دیگر برخوردار است. مقایسه مقادیر نرخ نفوذ تخمینی برای این دو مدل با مقادیر نرخ نفوذ مشاهده شده و نوفه‌زدایی شده در شکل ۹-۴۱ نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که مقادیر نرخ نفوذ تخمینی از مدل مبتنی بر داده‌های نوفه‌زدایی شده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر است. همچنین مشاهده می‌شود که در اعماق پایین‌تر مقادیر نرخ نفوذ تخمینی از مدل مبتنی بر داده‌های نوفه‌دار بیش برآورد شده است.

جدول ۹-۳۵. مقایسه نتایج بکارگیری دو مدل چاه KrA بر روی داده‌های نوفه‌دار و نوفه‌زدایی شده چاه

RSA

مقایسه با نرخ نفوذ نوفه‌زدایی شده		مقایسه با نرخ نفوذ نوفه‌دار		نام مدل
RMSE	R-square	RMSE	R-square	
۱/۰۰۸	۰/۳۵۷	۱/۱۱۳	۰/۲۲۱	Noisy MLP-COA
۰/۸۰۹	۰/۵۷۶	۱/۰۰۵	۰/۳۷۷	Denoised MLP-COA



شکل ۹-۴۱. مقایسه میان نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده در سرچاه، نوفه‌زدایی شده، تخمینی با داده‌های نوفه-دار و تخمینی با داده‌های نوفه‌زدایی شده در چاه RSA

با توجه به نتایج دو مدل در دو مرحله آموزش و آزمون می‌توان با اطمینان گفت که کاهش نوفه در داده‌ها، موجب افزایش دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های تخمین‌گر می‌گردد. این امر از آن‌جا ناشی می‌شود که نوفه‌زدایی داده‌ها موجب کاهش جزئیات تغییرات در داده‌ها می‌شود؛ بنابراین، بخش تقریب داده‌ها نقش بیشتری را در آموزش مدل ایفا می‌کند. از این‌رو؛ روند تغییرات نرخ نفوذ را در چاه آزمون، به خوبی پیش‌بینی می‌کند.

مراجع

- Aadnoy, B.S., 2010. Modern well design. CRC Press.
- Abdel-Aal, H.K., Alsahlawi, M.A., 2013. Petroleum economics and engineering. CRC Press.
- Abdideh, M., Fathabadi, M.R., 2013. Analysis of stress field and determination of safe mud window in borehole drilling (case study : SW Iran) 105–110.
- Ajibose, O.K., Wiercigroch, M., Akisanya, A.R., 2015. Experimental studies of the resultant contact forces in drillbit – rock interaction 91, 3–11.
- Akhlaghi, N., Rezaei, F., 2012. Estimated rate of penetration using artificial neural networks and optimize drilling parameters in directional wells in Ahvaz field. J. Chem. 1, 1–11.
- Al-ajmi, A., 2006. WELLBORE STABILITY ANALYSIS BASED ON A NEW TRUE-TRIAXIAL FAILURE CRITERION.
- Al-Ajmi, A., 2006. Wellbore stability analysis based on a new true-triaxial failure criterion.
- Al-Ajmi, A.M., Zimmerman, R.W., 2009. A new well path optimization model for increased mechanical borehole stability. J. Pet. Sci. Eng. 69, 53–62.
- Al Bulushi, N., King, P.R., Blunt, M.J., Kraaijveld, M., 2012. Artificial neural networks workflow and its application in the petroleum industry. Neural Comput. Appl. 21, 409–421.
- Albertin, M.L., Petmecky, S., Jay, C., Vinson, P., 2003. Drillability assessment in deepwater exploration. OTC 15295, 5–8.
- Alford, J., Blyth, M., Tollefsen, E., Crowe, J., Loreto, J., Mohammed, S., Pistre, V., Rodriguez-Herrera, A., 2012. Sonic Logging While Drilling-Shear Answers. Oilf. Rev. 24, 4–15.
- Ali, J.K., 1994. Neural networks: a new tool for the petroleum industry? In: European Petroleum Computer Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Altindag, R., Guney, A., 2010. Predicting the relationships between brittleness and mechanical properties (UCS, TS and SH) of rocks. Sci Res Essays 5, 2107–2118.
- Alum, M.A., Egbon, F., 2011. Semi-Analytical Models on the Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration (ROP). In: Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Amar, K., Ibrahim, A., 2012. Rate of Penetration Prediction and Optimization using Advances in Artificial Neural Networks, a Comparative Study. Proc. 4th Int. Jt. Conf. Comput. Intell. 647–652.
- Andrews, R., Hareland, G., Nygaard, R., Engler, T., 2007. Methods of Using Logs to Quantify Drillability. In: SPE Rocky Mountain Oil & Gas Technology Symposium. Denver.

- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., 2017a. Shear wave travel time estimation from petrophysical logs using ANFIS-PSO algorithm: A case study from Ab-Teymour Oilfield. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 38, 373–387.
- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., 2017b. Determination of Constant Coefficients of Bourgoyne and Young drilling rate Model Using a Novel Evolutionary Algorithm. *J. Min. Environ.*
- Anemangely, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmechi, B., 2017c. Safe Mud Weight Window Determination Using Log Based Methodology. In: 79th EAGE Conference and Exhibition 2017.
- Ansari, H.R., Sarbaz Hosseini, M.J., Amirpour, M., 2016. Drilling rate of penetration prediction through committee support vector regression based on imperialist competitive algorithm. *Carbonates and Evaporites.*
- Arabjamaloei, R., Shadizadeh, S., 2011. Modeling and Optimizing Rate of Penetration Using Intelligent Systems in an Iranian Southern Oil Field (Ahwaz Oil Field). *Pet. Sci. Technol.* 29, 1637–1648.
- Babak, O., Deutsch, C. V, 2009. Statistical approach to inverse distance interpolation. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 23, 543–553.
- Bagheripour, P., Gholami, A., Asoodeh, M., Vaezzadeh-Asadi, M., 2015. Support vector regression based determination of shear wave velocity. *J. Pet. Sci. Eng.* 125, 95–99.
- Bahari, A., Baradaran Seyed, A., 2007. Trust-region approach to find constants of Bourgoyne and Young penetration rate model in Khangiran Iranian gas field. In: *Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Bahari, M.H., Bahari, A., Moradi, H., 2011. Intelligent drilling rate predictor 7, 1511–1519.
- Bahari, M.H., Bahari, A., Nejati Moharrami, F., Naghibi Sistani, M.B., 2008. Determining Bourgoyne and Young Model Coefficients Using Genetic Algorithm to Predict Drilling Rate. *Appl. Sci.* 8, 3050–3054.
- Bataee, M., Mohseni, S., 2011. Application of Artificial Intelligent Systems in ROP Optimization: a Case Study in Shadegan Oil Field. *Society of Petroleum Engineers, Muscat, Oman.*
- Berthold, M., Hand, D.J., 2003. *Intelligent data analysis: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- Bezminabadi, S.N., Ramezanzadeh, A., Jalali, S.-M.E., Tokhmechi, B., Roustaei, A., 2017. Effect of Rock Properties on Rop Modeling Using Statistical and Intelligent Methods: A Case Study of an Oil Well in Southwest of Iran. *Arch. Min. Sci.* 62, 131–144.
- Bingham, G., 1965. A new approach to interpreting rock drillability. *Tech. Man. Repr. Oil Gas Journal*, 1965. 93P.

- Bishop, C., 2007. *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*, 1st edn. 2006. corr. 2nd printing edn. Springer, New York.
- Bishop, C.M., 1995. *Neural networks for pattern recognition*. Oxford university press.
- Bjornsson, E., Hucik, B., Szutiak, G., Brown Jr, L., Evans, H., Curry, D., Perry, P., 2004. Drilling optimization using bit selection expert system and ROP prediction algorithm improves drilling performance and enhances operational decision making by reducing performance uncertainties. Society of Petroleum Engineers.
- Black, A.D., Bland, R.G., Curry, D., Ledgerwood, L.W., Robertson, H., Judzis, A., Prasad, U., Grant, T., 2008. Optimization of Deep-Drilling Performance With Improvements in Drill-Bit and Drilling-Fluid Design. In: IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Blanton, T.L., Olson, J.E., 1997. Stress magnitudes from logs: effects of tectonic strains and temperature. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Bourgoyne, A., Millheim, K., Chenevert, M., Young, F., 2003. *Applied drilling engineering*. SPE, Richardson.
- Bourgoyne, A.T., Chenevert, M.E., Millheim, K.K., Young, F., 1991. *Applied drilling engineering*. Society of Petroleum Engineering of AIME [ie Society of Petroleum Engineers of AIME].
- Bourgoyne, Young, 1974. A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection. *Soc. Pet. Eng. J.* 14, 371–384.
- Brocher, T.M., 2005. Empirical relations between elastic wavespeeds and density in the Earth's crust. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 2081–2092.
- Brocher, T.M., 2008. Key elements of regional seismic velocity models for long period ground motion simulations. *J. Seismol.* 12, 217–221.
- Caicedo, H.U., Calhoun, W.M., Ewy, R.T., 2005. Unique ROP predictor using bit-specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling performance. In: SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Calhoun, W.M., Ewy, R.T., 2009. Method for estimating confined compressive strength for rock formations utilizing skempton theory.
- Cardiff, M., Kitanidis, P.K., 2010. Fitting data under omnidirectional noise: a probabilistic method for inferring petrophysical and hydrologic relations. *Math. Geosci.* 42, 877–909.
- Carroll, R.D., 1969. The determination of the acoustic parameters of volcanic rocks from compressional velocity measurements. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Elsevier, pp. 557–579.
- Castagna, J.P., Backus, M.M., 1993. AVO analysis-tutorial and review. *Offset-*

dependent reflectivity theory Pract. AVO Anal. 3–36.

- Castagna, J.P., Batzle, M.L., Eastwood, R.L., 1985. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics* 50, 571–581.
- Chakrabarti, S., Cox, E., Frank, E., Güting, R.H., Han, J., Jiang, X., Kamber, M., Lightstone, S.S., Nadeau, T.P., Neapolitan, R.E., 2008. *Data mining: know it all*. Morgan Kaufmann.
- Chang, C., Zoback, M.D., Khaksar, A., 2006. Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks. *J. Pet. Sci. Eng.* 51, 223–237.
- De Stefano, G., Young, S., 2009. The prevention and cure of bit balling in water based drilling fluids. In: *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*. Offshore Mediterranean Conference.
- Demuth, H.B., Beale, M.H., De Jess, O., Hagan, M.T., 2014. *Neural network design*. Martin Hagan.
- Desbrandes, R., 1985. *Encyclopedia of well logging*. Editions OPHRYS.
- Devereux, S., 1999. *Drilling technology in nontechnical language*. PennWell Books.
- Diodato, N., Ceccarelli, M., 2005. Interpolation processes using multivariate geostatistics for mapping of climatological precipitation mean in the Sannio Mountains (southern Italy). *Earth Surf. Process. Landforms* 30, 259–268.
- Dollinger, G., Handewith, H., Breeds, C., 1998. Use of the punch test for estimating TBM performance. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 13, 403–408.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography (Cop.)*. 36, 27–46.
- Duan, J., Zhao, J., Xiao, L., Yang, C., Li, C., 2015. A ROP Optimization Approach Based on Improved BP Neural Network PSO. *Adv. Swarm Comput. Intell.* 9142, 185–193.
- Eren, T., Ozbayoglu, M.E., 2010. Real time optimization of drilling parameters during drilling operations. In: *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Eskandari, H., Rezaee, M., Javaherian, a., M, 2003. Shear Wave Velocity Estimation Utilizing Wireline Logs for a Carbonate Reservoir, South-West Iran. *Irpds.Com* 4, 209–221.
- Farmer, C.L., 2002. Upscaling: a review. *Int. J. Numer. methods fluids* 40, 63–78.
- Feng, X.-T., Hudson, J.A., Tan, F., 2013. *Rock characterisation, modelling and engineering design methods*. CRC Press.

- Fertl, W., 1976. Abnormal Formation Pressures: implications to exploration, drilling and production of oil and gas reservoirs. *Development in Petroleum Science* 2.
- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, a M., Risnes, R., 2008. *Petroleum Related Rock Mechanics, Marine Environmental Research*. Elsevier.
- Formighieri, S., Filho, P.J.D.F., 2016. Estimation of Bourgoyne and Young Model coefficients using Markov Chain Monte Carlo simulation. *Proc. - Winter Simul. Conf.* 2016–Febru, 1172–1183.
- Galle, E.M., Woods, H.B., 1963. Best constant weight and rotary speed for rotary rock bits. In: *Drilling and Production Practice*. American Petroleum Institute.
- García, L.P.F., de Carvalho, A.C., Lorena, A.C., 2013. Noisy data set identification. In: *International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems*. Springer, pp. 629–638.
- García, S., Luengo, J., Herrera, F., 2015. *Data preprocessing in data mining*. Springer.
- Garnier, A.J., Van Lingen, N.H., 1959. Phenomena affecting drilling rates at depth.
- Gatlin, C., 1960. *Petroleum engineering, drilling and well completions*. ENGLEWOOD CLIFFS, NEW JERSEY, PRENTICE-HALL INC., 1960. 341 P.
- Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V., Hanachi, J., 2014a. Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 6, 13–25.
- Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V., Hanachi, J., 2014b. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *Rock Mech. Geotech. Eng.* 6, 13–25.
- Goktan, R., Yilmaz, N.G., 2005. A new methodology for the analysis of the relationship between rock brittleness index and drag pick cutting efficiency. *JOURNAL-SOUTH AFRICAN Inst. Min. Metall.* 105, 727.
- Gstalter, S., Raynal, J., 2013. Measurement of Some Mechanical Properties of Rocks And Their Relationship to Rock Drillability. *J. Pet. Technol.* 18, 991–996.
- Gui, M., 2008. The Basics of Noise Detection and Filtering for Borehole Drilling Data. *open Civ. Eng. J.* 2, 113–120.
- Hagan, M.T., Menhaj, M.B., 1994. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. *IEEE Trans. Neural Networks* 5, 989–993.
- Handewit. Hj, 1970. Predicting economic success of continuous tunneling in hard rock. *Can. Min. Metall. Bull.* 63, 595.
- Hankins, D., Salehi, S., Karbalaei Saleh, F., 2015. An Integrated Approach for Drilling Optimization Using Advanced Drilling Optimizer. *J. Pet. Eng.* 2015.
- Hareland, G., Hoberock, L.L., 1993. Use of drilling parameters to predict in-situ stress

- bounds. In: SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Haykin, S., 1999. *Neural network: a comprehensive foundation*, Second. ed. Tom Robbins.
- Head, A.L., 1951. A Drillability Classification of Geological Formation. In: 3rd World Petroleum Congress. World Petroleum Congress.
- Hoek, E., 1988. The Hoek-Brown failure criterion-a 1988 update. In: Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto, pp. 31–38.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1980. *Underground excavations in rock*.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34, 1165–1186.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. *Proc. NARMS-Tac 1*, 267–273.
- Hoek, E., Wood, D., Shah, S., 1992. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses. In: Proc. Rock Characterization, Symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock. pp. 209–214.
- Horne, B.G., 1993. Progress in supervised neural networks. *Signal Process. Mag. IEEE* 10, 8–39.
- Hoseinie, S.H., Ataei, M., Osanloo, M., 2009. A new classification system for evaluating rock penetrability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 46, 1329–1340.
- Howard, N.K., 2005. *Multiscale analysis of landscape data sets from northern Ghana: Wavelets and pattern metrics*. Cuvillier Verlag.
- Hucka, V., Das, B., 1974. Brittleness determination of rocks by different methods. Elsevier, pp. 389–392.
- Iqbal, F., 2008. SPE 114543 Drilling Optimization Technique – Using Real Time Parameters. pp. 28–30.
- Jaccard, J., Turrisi, R., 2003. *Interaction effects in multiple regression*. Sage.
- Jeong, H.Y., Cho, J.W., Jeon, S., Rostami, J., 2015. Performance Assessment of Hard Rock TBM and Rock Boreability Using Punch Penetration Test. *Rock Mech. Rock Eng.*
- Jing Ning, Fan Honghai, Yinghu, Z., Liu Tianyu, 2013. A New Model of ROP Prediction for Drilling Engineering with Data Mining Technology. *Int. J. Adv. Inf. Sci. Serv. Sci.* 5, 597–604.
- Kahraman, S., Alber, M., 2006. Estimating unconfined compressive strength and elastic modulus of a fault breccia mixture of weak blocks and strong matrix. *Int. J. rock Mech. Min. Sci.* 43, 1277–1287.
- Kahraman, S., Altindag, R., 2004. A brittleness index to estimate fracture toughness.

- Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41, 343–348.
- Kahraman, S., Balcı, C., Yazıcı, S., Bilgin, N., 2000. Prediction of the penetration rate of rotary blast hole drills using a new drillability index. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, 729–743.
- Kahraman, S., Fener, M., Kozman, E., 2012. Predicting the compressive and tensile strength of rocks from indentation hardness index. *J. South. African Inst. Min. Metall.* 112, 331–339.
- Kelessidis, V.C., 2011. Rock drillability prediction from in situ determined unconfined compressive strength of rock. *J. South. African Inst. Min. Metall.* 111, 429–436.
- Keshavarz Moraveji, M., Naderi, M., 2016. Drilling rate of penetration prediction and optimization using response surface methodology and bat algorithm. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 31, 829–841.
- Keshavarzi, R., Jalili, S., 2014. Building a mechanical earth model and its application in a geomechanical analysis of hydraulic fracture behaviour in naturally fractured reservoirs. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 8189, 1–22.
- Kirsch, G., 1898. *Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre.* Springer.
- Lama, R.D., Vutukuri, V.S., 1978. *Handbook on mechanical properties of rocks-testing techniques and results-volume iii.*
- Li, J., Cheng, K., Wang, S., Morstatter, F., Trevino, R.P., Tang, J., Liu, H., 2016. Feature selection: A data perspective. *arXiv Prepr. arXiv1601.07996.*
- Li, W., Zhao, X., Li, Y., Ji, Y., Peng, H., Liu, L., Yang, Q., 2015. Laboratory investigations on the effects of surfactants on rate of penetration in rotary diamond drilling. *J. Pet. Sci. Eng.* 134, 114–122.
- Liao, X., Yu, P., 2008. *Absolute stability of nonlinear control systems.* Springer Science & Business Media.
- Lorena, A.C., de Carvalho, A.C., 2004. Evaluation of noise reduction techniques in the splice junction recognition problem. *Genet. Mol. Biol.* 27, 665–672.
- Ma, H., 2011. Formation drillability prediction based on multi-source information fusion. *J. Pet. Sci. Eng.* 78, 438–446.
- Macini, P., Magagni, M., Da Dalt, G., Valente, P., 2007. Bit performance evaluation revisited by means of bit Index and formation drillability catalogue. In: *SPE/IADC Middle East Drilling and Technology Conference.* Society of Petroleum Engineers.
- Macini, P., Magagni, M., Valente, P., 2005. Drill-bit catalog and bit index: a new method for bit performance evaluation. In: *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference.* Society of Petroleum Engineers.
- Maidla, E., Ohara, S., 1991. Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drill Bit WOB and Drillstring Rotation. *SPE Drill. Eng.* 6, 189–195.

- Maimon, O., Rokach, L., 2005. Data mining and knowledge discovery handbook, second. ed, Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. Springer.
- Maldla, E.E., Ohara, S., Campinas, S.U., 1991. Field Verification of Drilling Models and Computerized Selection of Drill Bit , WOB , and Drillsring Rotation 189–195.
- Maleki, S., Moradzadeh, A., Ghavami, R., Gholami, R., 2014. Prediction of shear wave velocity using empirical correlations and artificial intelligence methods. NRIAG J. Astron. Geophys. 3, 70–81.
- Maletic, J.I., Marcus, A., 2000. Data Cleansing: Beyond Integrity Analysis. In: IQ. Citeseer, pp. 200–209.
- Mansouri, M., Moomivand, H., 2010. Influence of rock mass properties on TBM penetration rate in Karaj-Tehran water conveyance tunnel. J. Geol. Min. Res. 2, 114–121.
- Marwala, T., 2013. Economic modeling using artificial intelligence methods. Springer.
- Matti, H., 1999. Rock excavation handbook. Sandvik Tamrock Corp.
- Maurer, W.C., 1962. The“ perfect-cleaning” theory of rotary drilling. J. Pet. Technol. 14, 1–270.
- McLean, M.R., Addis, M.A., 1990. Wellbore stability analysis: a review of current methods of analysis and their field application. In: SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Mohr, O., 1900. Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials. Zeitschrift des Vereins Dtsch. Ingenieure 46, 1572–1577.
- Monazami, M., Hashemi, A., Shahbazian, M., 2012. Drilling rate of penetration prediction using artificial neural network: A case study of one of Iranian southern oil fields. J. Oil Gas Bus 6, 21–31.
- Montgomery, D.C., Peck, E.A., Vining, G.G., 2015. Introduction to linear regression analysis. John Wiley & Sons.
- Moradi, H., Bahari, M.H., Bagher, M., Sistani, N., 2010. Drilling rate prediction using an innovative soft computing approach 5, 1583–1588.
- Moraveji, M.K., Naderi, M., 2016. Drilling rate of penetration prediction and optimization using response surface methodology and bat algorithm. J. Nat. Gas Sci. Eng. 31, 829–841.
- Morris, R.I., 1969. Rock drillability related to a roller cone bit. In: Society of Petroleum Engineers. Society of Petroleum Engineers.
- Nascimento, A., Tamas Kutas, D., Elmgerbi, A., Thonhauser, G., Hugo Mathias, M., 2015. Mathematical Modeling Applied to Drilling Engineering: An Application of Bourgoyne and Young ROP Model to a Presalt Case Study. Math. Probl. Eng. 2015.

- Nauroy, J.-F., 2011. Geomechanics applied to the petroleum industry. Editions Technip.
- Nielsen, B.F., Tveito, A., 1998. An upscaling method for one-phase flow in heterogeneous reservoirs. A weighted output least squares (WOLS) approach. *Comput. Geosci.* 2, 93–123.
- Nourafkan, A., Kadkhodaie-Ilkhchi, A., 2015. Shear wave velocity estimation from conventional well log data by using a hybrid ant colony–fuzzy inference system: A case study from Cheshmeh–Khosh oilfield. *J. Pet. Sci. Eng.* 127, 459–468.
- Osgouei, R.E., Özbayoğlu, M.E., 2007. Rate of Penetration Estimation Model for Directional and Horizontal Wells. In: 16th International Petroleum and Natural Gas Congress and Exhibition of Turkey.
- Overton, H.L., 1973. A Dimensionally Derived Rock Drillability Equation. Society of Petroleum Engineers.
- Paiaman, A., Al-Askari, M., Salmani, B., 2009. Effect of Drilling Fluid Properties on Rate of Penetration. *Nafta* 129–134.
- Paul, R.K., 2006. Multicollinearity: Causes, effects and remedies. IASRI, New Delhi.
- Peng, S., Zhang, J., 2007. Engineering geology for underground rocks. Springer Science & Business Media.
- Persson, P.-A., Holmberg, R., Lee, J., 1993. Rock blasting and explosives engineering. CRC press.
- Pessier, R.C., Fear, M.J., 1992. Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Pickett, G.R., 1963. Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *J. Pet. Technol.* 15, 659–667.
- Plumb, R., Edwards, S., Pidcock, G., Lee, D., Stacey, B., 2000. The mechanical earth model concept and its application to high-risk well construction projects. In: IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Prasad, U., 2009. Drillability of a Rock in Terms of its Physico-Mechanical and Micro-Structural Properties. 43rd U.S. Rock Mech. Symp. 4th U.S. - Canada Rock Mech. Symp.
- Přikryl, R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38, 671–682.
- Quinlan, J.R., 1986. The effect of noise on concept learning. *Mach. Learn. An Artif. Intell. approach* 2, 149–166.
- Quiroga, J., Valera, R., Fernandez, A., Bravo, H., Arias, A.G., 2006. Innovative Technology/Best Practices Maximizes ROP Saving The Operator \$1.5 Million USD In Chicontepec Project, Mexico. In: International Oil Conference and Exhibition in Mexico. Society of Petroleum Engineers.

- Rahim, Z., Al-Qahtani, M.Y., Bartko, K.M., Goodman, H., Hilarides, W.K., Norman, W.D., 2003. The role of geomechanical earth modeling in the unconsolidated Pre-Khuff field completion design for Saudi Arabian gas wells. Pap. SPE 84258, 5–8.
- Rahimi, R., 2014. The effect of using different rock failure criteria in wellbore stability analysis. MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY.
- Rahimzadeh, H., Mostofi, M., Hashemi, A., 2011. A New Method for Determining Bourgoyne and Young Penetration Rate Model Constants. *Pet. Sci. Technol.* 29, 886–897.
- Rajabioun, R., 2011. Cuckoo optimization algorithm. *Appl. Soft Comput.* 11, 5508–5518.
- Ramezanzadeh, A., Hood, M., 2010. A state-of-the-art review of mechanical rock excavation technologies. *J. Min. Environ.*
- Ramezanzadeh, A., Rostami, J., Tadic, D., 2008. Impact of rock mass characteristics on hard rock TBM performance. In: 13th Australian Tunneling Conference, Melbourne, Australia. pp. 213–222.
- Reckmann, H., Jogi, P., Herbig, C., 2007. Using dynamics measurements while drilling to detect lithology changes and to model drilling dynamics. In: ASME 2007 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, pp. 915–924.
- Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B., 2003. Borehole breakout analysis from four-arm caliper logs. *World Stress map Proj.* 1–5.
- Rezaee, M.R., Kadkhodaie Ilkhchi, a., Barabadi, a., 2007. Prediction of shear wave velocity from petrophysical data utilizing intelligent systems: An example from a sandstone reservoir of Carnarvon Basin, Australia. *J. Pet. Sci. Eng.* 55, 201–212.
- Roy, S., Cooper, G.A., 1993. Prevention of bit balling in shales: Some preliminary results. *SPE Drill. Complet.* 8, 195–200.
- Santos, H., Placido, J.C.R., Oliveira, J.E., Gamboa, L., 2000. Overcoming hard rock drilling challenges. In: IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.
- Schön, J., 2011. *Physical properties of rocks: A workbook.* Elsevier.
- Shi, X., Meng, Y., Li, G., Li, J., Tao, Z., Wei, S., 2015. Confined compressive strength model of rock for drilling optimization. *Petroleum* 1, 40–45.
- Shieh, Y.-Y., Fouladi, R.T., 2003. The effect of multicollinearity on multilevel modeling parameter estimates and standard errors. *Educ. Psychol. Meas.* 63, 951–985.
- Shier, D.E., 2004. Well log normalization: methods and guidelines. *Petrophysics* 45.
- Shirkavand, F., Hareland, G., Aadnoy, B.S., 2009. Rock Mechanical Modelling for a Underbalanced Drilling Rate of Penetration Prediction. In: 43rd US Rock

- Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- Shrivastava, S.K., Javed, A., Pratap, K.K., 2013. Assessing Rock Compressive Strength and Predicting Formation Drillability using Sonic , Gamma & Density Logs. In: 10th Biennial International Conference & Exposition.
- Singh, R., Kainthola, A., Singh, T.N., 2012a. Estimation of elastic constant of rocks using an ANFIS approach. *Appl. Soft Comput. J.* 12, 40–45.
- Singh, R., Vishal, V., Singh, T.N., Ranjith, P.G., 2012b. A comparative study of generalized regression neural network approach and adaptive neuro-fuzzy inference systems for prediction of unconfined compressive strength of rocks. *Neural Comput. Appl.* 23, 499–506.
- Singh, T.N., Gupta, A.R., Sain, R., 2006. A comparative analysis of cognitive systems for the prediction of drillability of rocks and wear factor. *Geotech. Geol. Eng.* 24, 299–312.
- Siriwardene, N.R., Perera, B.J.C., 2006. Selection of genetic algorithm operators for urban drainage model parameter optimisation 44, 415–429.
- Skempton, A.W., 1984. The pore-pressure coefficients A and B. In: *SELECTED PAPERS ON SOIL MECHANICS*. Thomas Telford Publishing, pp. 65–69.
- Soliman, M.Y., Dusterhoft, R., 2016. THE MOHR-COULOMB FAILURE CRITERION. *Fract. Horiz. Wells*.
- Somerton, W., Esfandiari, F., Singhal, A., 1969. Further studies of the relation of physical properties of rock to rock drillability. Society of Petroleum Engineers.
- Somerton, W.H., 1959. A laboratory study of rock breakage by rotary drilling.
- Talabani, S., Chukwu, G., Hatzignatiou, D., 1993. Drilling successfully through deforming shale formations: Case histories. In: *Low Permeability Reservoirs Symposium*. Society of Petroleum Engineers.
- Tanaino, A., 2005. Rock classification by drillability. Part I: analysis of the available classifications. *J. Min. Sci.* 41, 541–549.
- Tao, Z., Meng, Y., Shi, X., Li, G., Liu, H., 2014. A Model of Drillability for Bottom Hole in Oil-Gas Well Engineering. *ejge.com* 19, 6939–6951.
- Teale, R., 1965. The concept of specific energy in rock drilling. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Elsevier, pp. 57–73.
- Thuro, K., Plinninger, R.J., 2003. Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability. In: 10th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics.
- Tiwary, D.K., Bayuk, I.O., Vikhorev, A.A., Chesnokov, E.M., 2009. Comparison of seismic upscaling methods: From sonic to seismic. *Geophysics* 74, WA3-WA14.

- Vidyasagar, M., 2002. Nonlinear systems analysis. SIAM.
- Walker, B.H., Black, A.D., Klauber, W.P., Little, T., Khodaverdian, M., 1986. Roller-bit penetration rate response as a function of rock properties and well depth. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- Wang, R.Y., Storey, V.C., Firth, C.P., 1995. A framework for analysis of data quality research. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 7, 623–640.
- Warren, J., Schabaram, R., 1946. Penetration Rates in Hard Formation Drilling. *Oil Gas Journal*, XLV, No. S (June 8, 1946) 82–87.
- Wu, A., Hareland, G., Rashidi, B., 2010. The effect of different rock types and roller cone insert types and wear on ROP (rate of penetration). American Rock Mechanics Association.
- Wu, X., 1995. Knowledge acquisition from databases. Intellect books.
- Yagiz, S., 2008. Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 23, 326–339.
- Yagiz, S., 2009. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 24, 66–74.
- Yagiz, S., Gokceoglu, C., Sezer, E., Iplikci, S., 2009. Application of two non-linear prediction tools to the estimation of tunnel boring machine performance. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 22, 808–814.
- Yagiz, S., Rostami, J., 2012. Indentation Test for the Measurement of Rock Brittleness. American Rock Mechanics Association.
- Yarali, O., Kahraman, S., 2011. The drillability assessment of rocks using the different brittleness values. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 26, 406–414.
- Zhang, J., 2011. Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Rev.* 108, 50–63.
- Zhang, Q., Gupta, K.C., 2000. Neural networks for RF and microwave design (Book+ Neuromodeler Disk). Artech House, Inc.
- Zhu, H.-Y., Deng, J.-G., Xie, Y.-H., Huang, K.-W., Zhao, J.-Y., Yu, B.-H., 2012. Rock mechanics characteristic of complex formation and faster drilling techniques in Western South China Sea oilfields. *Ocean Eng.* 44, 33–45.
- Zoback, M.D., 2007. Reservoir Geomechanics.
- Zou, D., 2017. Theory and Technology of Rock Excavation for Civil Engineering.

Abstract

Rock mass drillability is a quantitative index which is widely used in geology, mining engineering, petroleum engineering, and other engineering disciplines for evaluating how hard or easy is a rock mass to drill. Due to paramount importance of this parameter in improving the results of the models used to predict rate of penetration (ROP) of drilling tools, a wide spectrum of research has been done on determination of this parameter within the scope of mining and civil engineering. This is while, laboratory measurement of this parameter has been addressed in only limited number of oil and gas research works. In addition, due to failure to account for real well conditions, the introduced rock mass drillability index (RDI) in these research works is not practically applicable. Therefore, the present research develops a new RDI for oil and gas reservoir rocks which is consistent with the corresponding ROP model. For this purpose, operating parameters, petrophysical logs, and drilling reports from four wells drilled into three different fields were collected. Then, in order to determine geomechanical parameters of rock mass, one-dimensional well modeling was performed. In order to undertake extensive analyses on the collected data and understand the value of rock mass parameters in ROP models, the first level of data including three different databases was formed. The first database was introduced by operating parameters of each well only, while second and third databases were developed based on not only the operating parameters, but also petrophysical logs and geomechanical properties of rock mass, respectively. Since the results of field data-based models were highly dependent on the acquisition quality, raw data were subjected to preprocessing to attenuate the effect of noise and select the most significant parameters affecting ROP. In this respect, first, using spectral analysis and autocorrelation assessments, the presence and intensity of noise within data was assessed. Then, Savitzky–Golay (SG) filter was applied to attenuate the effect of noise on useful data. Continuing with the research, in order to select superior features in ROP estimation, plus-1 take-r search method was adopted on the first-level databases. On order to establish identical conditions for analyzing the results of ROP, five parameters in each database were considered for estimating ROP. Subsequently, ROP was modeled using multivariate nonlinear regression and multilayer perceptron (MLP) neural network methods based on the selected parameters in each database only. An investigation on the obtained values of ROP from the models developed based upon different first-level databases indicated that, on average, accuracies of the ROP estimation models developed based on the databases 2 and 3 using the regression method exceeded that of the model developed based on the database 1 by 7% and 13%, respectively. The same result was found for the models prepared using the neural network method, with the corresponding figures being 13% and 18%, respectively. Given the importance of rock properties in ROP models, continuing with the study, a number of punch tests were performed on core samples recovered from similar formations along two wells to extract rock mass brittleness and drillability. The force-penetration curve obtained for each rock sample in this test was used to determine three brittleness indices as well as the newly developed index called

rock mass drillability index. Investigation of the relationships between each of these indexes and ROP showed that, the developed index is well related to ROP via an exponential relationship. As such, in the next step, petrophysical and rock geomechanical logs were used to present a relationship for estimating RDI. Results of this evaluation demonstrated that, one can estimate the newly developed RDI at good accuracy using two geomechanical properties of rock mass, namely confined compressive strength and internal friction angle. Therefore, this index was calculated at all of the studied wells and the second-level databases containing operating parameters along with the proposed drillability index for each well were formed. In order to validate the new RDI in ROP models, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) was implemented on the second-level data for feature selection. The use of selected second-level parameters at each well in ROP modeling showed that, on average, accuracies of regression and MLP NN models were higher than that of the corresponding models based on the third first-level database by 16% and 28%, respectively. Moreover, a comparison between the results of the regression-based ROP estimator developed upon second-level data with the ROP model proposed by Burgin and Yang, when applied on the studied wells, showed that, on average, the second-level models were about 27% more accurate than the Burgin and Yang's. This is while, the model proposed by Burgin and Yang uses 9 different parameters while the proposed models in this research use as low as five parameters only.

Keywords: Rock drillability, Drilling rate penetration model, Punch indentation test, 1D modeling, Geo-mechanical parameters of rock, Data pre-processing



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

Ph.D Dissertation in Mining Engineering

**Developing a New Rock Drillability Index for Oil and Gas
Reservoirs Based on Drilling rate**

By: Mohammad Anemangely

Supervisor:

Dr. Ahmad Ramezanzadeh

Advisor:

Dr. Behzad Tokhmechi

September, 2017